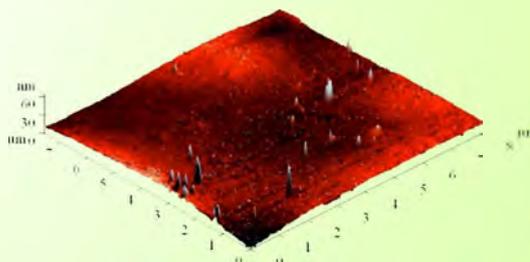
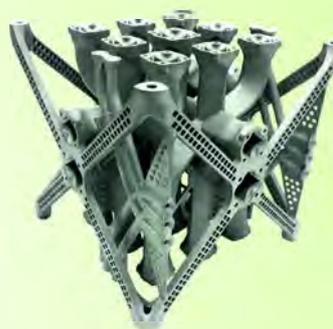
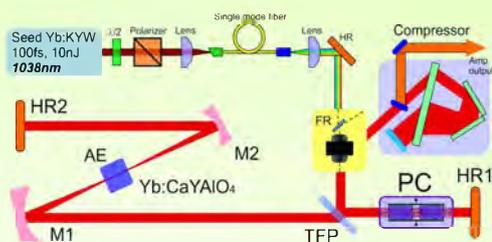




10-я Международная  
научно-техническая  
конференция

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ - 2017



Минск  
БНТУ  
2017



**MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS  
STATE COMMITTEE ON STANDARDIZATION OF THE REPUBLIC  
OF BELARUS  
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

**BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**

**BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY**

**INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF BELARUS**

# **INSTRUMENTATION ENGINEERING-2017**

**Proceedings  
of the 10th International Scientific and Technical Conference**

November 1–3, 2017  
Minsk, Belarus

**Minsk  
BNTU  
2017**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2017**

**Материалы  
10-й Международной научно-технической конференции**

1–3 ноября 2017 года  
Минск, Республика Беларусь

**Минск  
БНТУ  
2017**

УДК 681.2(063)  
ББК 34.9я431  
П75

**Редакционная коллегия:**

д-р техн. наук, профессор О.К. Гусев (председатель);  
канд. экон. наук, доцент Е.В. Гурина; д-р техн. наук, доцент Н.А. Жагора;  
д-р техн. наук, профессор М.Г. Киселёв; д-р физ.-мат. наук, доцент М.А. Князев;  
д-р физ.-мат. наук, профессор Н.В. Кулешов; д-р физ.-мат. наук., профессор  
А.М. Маляревич; д-р физ.-мат. наук, В.В. Машко; чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук,  
профессор Ю.М. Плескачевский; д-р техн. наук, доцент П.С. Серенков;  
д-р техн. наук, профессор В.Л. Соломахо; чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук,  
профессор С.А. Чижик; д-р физ.-мат. наук, профессор К.В. Юмашев; канд. техн. наук,  
доцент Р.И. Воробей, канд. техн. наук, доцент А.К. Тявловский (отв. секретарь)

**Рецензенты:**

д-р тех. наук, доцент Н.И. Мухуров;  
чл. корр. НАН Беларуси, д-р тех. наук, проф. А.В. Белый

Издание содержит материалы 10-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2017» по направлениям: измерительные системы и приборы, технические средства безопасности; методы исследований и метрологическое обеспечение измерений; физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения; управление производством и подготовка специалистов для приборостроительной отрасли.

Материалы конференции могут представлять интерес для научных работников, преподавателей вузов, аспирантов и магистрантов, специалистов реального сектора экономики, занимающихся исследованиями, разработкой и производством приборов и измерительных систем.

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ**

УДК 531.385

**ГИРОСТАБИЛИЗАТОРЫ НА ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПАХ****Распопов В.Я.**ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

Рассмотрены принципы и особенности работы гиростабилизатора на волновом твердотельном гироскопе (ВТГ), работающего в режимах датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС) и интегрирующего гироскопа (ВТГ-ИГ).

**Введение.** Принцип работы волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) основан на использовании инертных свойств упругих волн, возбуждаемых в виде радиальных колебаний на второй моде в полусферическом, цилиндрическом или кольцевом резонаторах [1, 2].

Брайен Г.Х. в 1890 г. показал, что при вращении вибрирующей оболочки в результате действия инерционных сил Кориолиса происходит расщепление собственной частоты основной формы изгибных колебаний её стенок, что приводит к прецессии стоячей волны как относительно оболочки, так и в инерциальном пространстве.

Определяя положение стоячей волны, зависящее от угловой скорости  $\Omega$  относительно корпуса, можно получить информацию об угле поворота и угловой скорости основания в инерциальном пространстве.

Передаточные функции ВТГ-ДУС и ВТГ-ИГ, работающих в разомкнутом контуре, имеют соответственно вид

$$W_{\text{ДУС}}(s) = K_M W_{\text{ЭБ}}(s);$$

$$W_{\text{ИГ}} = \frac{K}{s} W_{\text{ЭБ}}(s),$$

где  $K_M = 4KQ/\omega_0$ ;  $K$  – масштабный коэффициент резонатора ВТГ;  $Q, \omega_0$  – добротность и собственная частота колебаний резонатора;  $W_{\text{ЭБ}}(s)$  – передаточная функция электронного блока обработки сигналов.

Для повышения точности измерений возможна работа ВТГ в замкнутом контуре, который обеспечивает сведение выходных перемещений кромки резонатора к нулю. В этом случае выходным сигналом является значение компенсационного напряжения.

**Результаты.** Уравнения движения двухосного гиростабилизатора имеют вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} A\ddot{\alpha} + b_p\dot{\alpha} + M_{\text{д1}} &= M_p; \\ B\ddot{\beta} + b_n\dot{\beta} + M_{\text{д2}} &= M_n; \end{aligned} \right\}$$

где  $A, B$  – моменты инерции гиростабилизатора относительно осей подвеса;  $b_p, b_n$  – коэффициенты вязкого трения по осям подвеса;

$\alpha$  – угол, определяющий положение рамы гиростабилизатора относительно корпуса;  $\beta$  – угол, определяющий положение платформы, на которой установлены ВТГ, относительно рамы.

$$M_{\text{д1}} = K_M K_p \dot{\alpha}; M_{\text{д2}} = K_M K_n \dot{\beta} \text{ – для ВТГ – ДУС;}$$

$$M_{\text{д1}} = K K_p \int \dot{\alpha} d\tau; M_{\text{д2}} = K K_n \int \dot{\beta} d\tau; \text{– для ВТГ – ИГ.}$$

$M_{\text{д1}}, M_{\text{д2}}$  – моменты двигателей стабилизации относительно осей подвеса рамы и платформы.

$K_p = K_{\text{эб1}} K_{y1} K_{\text{дс1}}$ ;  $K_n = K_{\text{эб2}} K_{y2} K_{\text{дс2}}$  – коэффициенты передачи по каналам стабилизации в предположении, что электронные блоки, усилители и безредукторные двигатели стабилизации не имеют инерционности;

$M_p, M_n$  – возмущающие моменты.

При отсутствии перекрёстных связей между каналами они идентичны. Уравнение движения по каналу стабилизации для оси подвеса рамы с ВТГ – ДУС:

$$A\ddot{\alpha} + (b_p + K_M K_p)\dot{\alpha} = M_p. \quad (1)$$

В соответствии с уравнением (1) его передаточная функция имеет вид:

$$\frac{\alpha(s)}{M_p(s)} = \frac{1}{s(As + b_p + K_M K_p)}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что под действием момента  $M_p$  гиростабилизатор в установившемся режиме имеет дрейф с угловой скоростью:

$$\dot{\alpha} = \omega_{\text{др1}} = M_p / (b_p + K_M K_p).$$

Аналогично для второго канала стабилизации имеется угловая скорость дрейфа:

$$\dot{\beta} = \omega_{\text{др2}} = M_n / (b_n + K_M K_n).$$

Уравнение движения гиростабилизатора по оси подвеса рамы для случая применения ВТГ – ИГ:

$$A\ddot{\alpha} + b_p\dot{\alpha} + K K_p \int \dot{\alpha} d\tau = M_p. \quad (3)$$

В уравнении (3) введём замену  $\dot{\alpha}(t) = x(t)$  и запишем передаточную функцию:

$$\frac{x(s)}{M_p(s)} = \frac{K_0(s)}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \quad (4)$$

где  $K_0 = 1/K K_p$ ,  $T = \sqrt{A/K K_p}$ ,  $\xi = b_p/2\sqrt{A K K_p}$ .

В соответствии с (4) гиросtabilизатор не имеет в установившемся режиме дрейфа. Аналогичный результат имеет место и для второго канала стабилизации по оси подвеса платформы. Однако, как следует из (3), соответствующее ему характеристическое уравнение имеет один нулевой корень, то есть по угловым координатам гиросtabilизатор не обладает астатизмом. Действительно, учитывая, что  $\int_0^t \dot{\alpha} dt = \alpha(t)$ , из уравнения (3) следует передаточная функция по углу:

$$\frac{\alpha(s)}{M_p(s)} = \frac{K_0}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}. \quad (5)$$

Следовательно, в установившемся режиме гиросtabilизатор имеет статическую ошибку  $\alpha_{ст} = M_p / KK_p$ , аналогичную статической ошибке гиросtabilизатора с трёхстепенным астатическим гироскопом.

Оценку поведения гиросtabilизатора на качающемся основании можно выполнить на примере уравнений движения гиросtabilизатора по одному каналу, полагая, что качка происходит по углу  $\gamma$  относительно оси подвеса рамы:

$$\left. \begin{aligned} A\ddot{\alpha} + b_p \dot{\alpha} + J_p i^2 \ddot{\gamma} &= M_p - iM_{д1}; \\ M_{д1} &= KK_p \alpha - ih_p \alpha_1; \\ \alpha_1 &= \gamma - \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $J_p$  – осевой момент инерции ротора двигателя стабилизации;  $h_p$  – коэффициент вязкого трения в подшипниках ротора;  $\alpha_1$  – угол поворота рамы гиросtabilизатора относительно основания.

Объединяя уравнения (6), получим передаточные функции по возмущающему моменту и углу качки:

$$\frac{\alpha(s)}{M_p(s)} = \frac{1}{As^2 + b_p s + i(KK_p + ih_p)}, \quad (7)$$

$$\frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = -\frac{i^2(J_p s^2 - h_p)}{As^2 + b_p s + i(KK_p + ih_p)}. \quad (8)$$

УДК 616-77, 681.2

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГОЭЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРТЕРИАЛЬНОЙ СТЕНКИ НА ФАНТОМАХ

Савченко А.Л., Минченя В.Т., Минченя Н.Т.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Как известно [1], окклюзионно-стенотические поражения магистральных артерий крупного и среднего калибра, наблюдающиеся при таких заболеваниях как, облитерирующий атеросклероз нижних конечностей, ишемические формы синдрома диабетической стопы при сахарном диабете, приводят к снижению качества жизни и ранней инвалидизации.

Для безредукторного двигателя стабилизации ( $i = 1, h_p = 0$ ) из (7), как частный случай, следует (5). Передаточная функция (8) может быть применена для анализа поведения гиросtabilизатора на основании, качающемся с разными частотами.

Гиросtabilизаторы на ВТГ являются базой для построения перспективных навигационных систем [4].

**Заключение.** Динамика гиросtabilизаторов с ВТГ-ДУС и ВТГ-ИГ, как и в гиросtabilизаторах с другими типами гироскопов имеет накапливаемую ошибку с ВТГ-ДУС и статическую ошибку с ВТГ-ИГ. Для их устранения в контур стабилизации необходимо ввести акселерометр и применить калмановскую фильтрацию сигналов. При этом гиросtabilизатор будет следить за кажущейся вертикалью. Учет погрешностей гироскопов и акселерометров может быть выполнен по рекомендациям работы [5]. Анализ динамики гиросtabilизатора с ВТГ на качающемся основании может быть выполнен на основе передаточных функций по возмущающему моменту и углу качки, из которых следует, что в качественном отношении его динамика аналогична динамике индикаторных гиросtabilизаторов с любым типом гироскопов.

1. Журавлев В. Ф. Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985. – 129 с.
2. Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. – М.: МГТУ им. Баумана, 1998. – 115 с.
3. Распопов В. Я. Теория гироскопических систем. Гиросtabilизаторы: учебное пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, – 2016. – 385 с.
4. Матвеев В. А., Лунин Б. С., Басараб М. А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 239 с.
5. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС – датчиках. Учебное пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, – 2017. – 214 с.

Предлагается впервые в мировой практике изучить влияние внутрисосудистого ультразвукового воздействия на повышение эластичности артериальной стенки при атеросклерозе и сахарном диабете. Для этого также впервые в мировой практике предлагается трубчатая катетерно-волноводная система для воздействия на сосудистые образования и артериальную стенку.

Для проведения экспериментальных исследований разработан специальный аппаратно-программный комплекс.

Комплекс условно можно разбить на две части:

- гибкая волноводная система, состоящая из волновода, управляемого генератора ультразвуковых колебаний, катетерной системы для подачи физиологической жидкости;

- средства оценки геометрических и механических параметров образца.

Разрабатываемый комплекс должен позволять измерять геометрические параметры, плотность, модули Юнга и Петерсона, коэффициент растяжимости и коэффициент податливости, скорость пульсовой волны и массу артериального сегмента образца.

Наибольшую сложность представляет устройство, которое позволит нагружать трубчатый фантом сосуда внутренним давлением. При этом требуется разработка следующих узлов.

1. Средство создания внутреннего давления.

2. Средство измерения внутреннего давления и его колебаний с передачей результатов измерения в персональный компьютер для дальнейшей обработки и регистрации. В состав этого узла должна входить механическая и электрическая аппаратная части и программная часть (программа для микроконтроллера и программа для ЭВМ).

3. Средства сопряжения узла создания и измерения давления с гибкой волноводной системой.

Структура системы показана на рис. 1.



Рисунок 1 – Структура системы

Фантом сосуда подвергается внутреннему давлению посредством баллонного катетера. Давление создается приспособлением через рас-

пределитель. То же давление через распределитель поступает на датчик давления для его измерения и регистрации посредством электронной схемы и персонального компьютера. При подаче давления измеряется деформация фантома, сигнал от измерителя которого также может обрабатываться персональным компьютером. В процессе измерения на фантом сосуда осуществляется ультразвуковое воздействие.

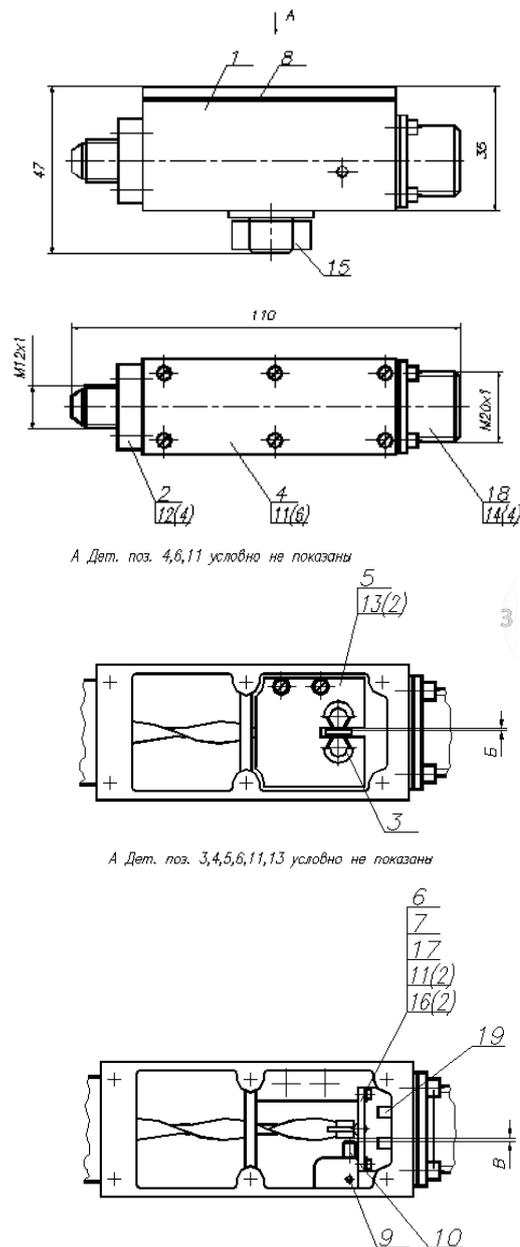


Рисунок 2 – Конструкция датчика

Гибкая волноводная система была разработана и опробована на предыдущих этапах исследований.

Управляемый генератор ультразвуковых колебаний ранее использовался для акустоиндуцированного тромбозиса с использованием

сплошных волноводов. Технические характеристики (диапазон частот, мощность) позволяют использовать его для исследований.

В качестве устройства создания давления используется готовая система баллонного катетера для ангиопластики.

Для измерения деформации фантома сосуда используются покупные индикаторы часового типа, закрепляемые в стойке, в том числе с выходом на компьютер.

Датчик для измерения давления в диапазоне 0...30 атм с преобразованием в электрический сигнал выполнен на основе малогабаритного дифференциального индуктивного преобразователя.

Конструкция датчика показана на рис. 2.

Основным узлом датчика является упругий элемент 2, выполненный в виде штуцера с пустотелой спиральной трубкой, которая раскручивается при подаче в нее воздуха под давлением. На конце трубки закреплен якорь в виде пластины из низкоуглеродистой стали, который расположен между полюсами преобразователей 3, установленных на пластине 5. Для сохранения устойчивости спиральной трубки ее свободный конец поддерживается опорой в виде шарика 17, закрепленного с помощью планки 6. Положение шарика регулируется прокладками 7. Провода от датчиков выведены на электрический разъем 18.

Электронная часть аппаратно-программного комплекса состоит из двух узлов – операционной части и интерфейсной части.

Операционная часть представляет собой измерительный тракт для обработки сигнала

дифференциального бесконтактного измерительного преобразователя перемещения. Основные функции, выполняемые операционной частью, следующие: формирование исходного информационного сигнала; усиление исходного информационного сигнала; выделение из исходного сигнала информативной постоянной составляющей (детектирование); усиление и фильтрация выделенного сигнала; преобразование сигнала в цифровую форму.

Схема выполнена на основе специализированной микросхемы AD698 (AD598) фирмы Analog Devices. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой использован АЦП, встроенный в микроконтроллер C8051F352 фирмы Silicon Labs. Для подключения к ПЭВМ используется интерфейс RS-232C с преобразователем уровня MAX232A.

Для отображения результатов измерения на экране ПЭВМ используется текстовый вариант, который удобен представлением результатов в виде таблицы чисел, с которыми удобно работать: экспортировать в табличный редактор, например, Microsoft Excel, выполнять с ними различные вычислительные операции, построение графиков и т. д.

Для реализации этого варианта используется программа HyperTerminal.

1. Клиническая ангиология / под ред. А.В. Покровского – М.: Медицина, 2004. – Т.1. – 808 с.

УДК 006.91(042.3)(476)

## СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТРОЛОГИИ

Гуревич В.Л.

Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

Метрология как наука, которая занимается вопросами измерений и их применением, содействует внедрению современных технологических процессов, разработке новых видов продукции и повышению конкурентоспособности промышленности в целом.

Остановимся на отдельных аспектах метрологии, поскольку именно они непосредственно оказывают существенное влияние на развитие науки, промышленности, и, в частности, на приборостроение и машиностроение.

Если говорить об основных изменениях в метрологии, то в ближайший год нас ожидает следующее. В первую очередь, это пересмотр Международной системы единиц (SI), который потребует нового подхода к пониманию этих величин, их передаче, обеспечению потребностей промышленности.

Второй аспект – это совершенствование информационных технологий, которые определенным образом сказываются на промышленных технологиях, развитие современных сенсорных технологий, т. е. новых датчиков, которые будут использоваться в рамках концепции Индустрия 4.0, переход к которой видоизменяет сферу оказания метрологических услуг.

### Теоретическая метрология

В ближайшие годы предстоит создание эталонов единиц, которые будут опираться на фундаментальные физические константы. Мы должны будем постепенно, но достаточно быстро, отойти от артефактов, которые используем (килограмм), и перейти к созданию эталонов, связанных исключительно с фундаментальными физическими эффектами. Далее это развитие уже фундаментальной метрологии на уровне одиночных фотонов, одиночных атомов и одиночных молекул, поскольку этого

требуют новые существующие технологии. Определенные работы в этом направлении уже ведутся, например, в области расходомерии, с целью создания расходомеров, позволяющих очень точно определять расход жидкостей и газов на основании одиночных молекул. То есть фактически происходит снижение уровня неопределенности и повышение более точных результатов измерений, которые не меняются.

Если говорить о переопределении единиц системы SI, то первоначально к этому процессу подтолкнуло наблюдение за артефактом – платино-иридиевым килограммом, поскольку обнаружили, что за последние 150 лет его масса изменилась примерно на 50 мг. Этот артефакт находится в Севре близ Парижа в Международном бюро мер и весов. Может быть с точки зрения промышленной метрологии вчерашнего дня это не выглядит существенным, но сегодня мы имеем дело с нанометрологией, с наноизмерениями и в этом аспекте – это чувствительное влияние на результаты измерений. Мы должны перейти к более точному установлению единиц величин, которые будут воспроизводиться независимо в различных лабораториях.

В данной ситуации новыми ключевыми позициями в этой системе является то, что фиксируются фундаментальные физические константы. Будут уточнены определения килограмма, ампера, кельвина и моля, потому что ампер, кельвин и моль взаимосвязаны с новым определением килограмма.

Очень важен аспект прослеживаемости. У нас существует классический механизм прослеживаемости от Международного бюро мер и весов через национальные метрологические институты до промышленных лабораторий. В будущем можно создавать средства измерений очень высокого уровня точности, которые могут массово применяться в промышленности и самокалиброваться. Это позволит существенно повысить точность измерений, приблизить их к национальным метрологическим институтам и в некоторой степени исключить промежуточные звенья в процессе передачи единиц величин от Международного бюро мер и весов к потребителю.

Если говорить о новом взгляде на систему SI, то она будет опираться на постоянную Планка, Больцмана, Авагадро, на частоту перехода, которая связана со сверхтонким расщеплением основного атома цезия-133 на элементарный заряд электрона и спектральную силу светового потока. Из этого следует, что теперь уже килограмм не будет тем килограммом, к которому мы с вами привыкли. Он будет опираться на значение постоянной Планка, которое сейчас должны будут зафиксировать. Ампер будет определяться на основании численного значения элементарного заряда, потому что традиционное определение ампера, к которому привыкли, в принципе, технически не реализуемо. Кельвин, оставаясь единицей температуры, будет опираться исключительно на постоянную Больцмана. Сегодня есть несколько инновационных

вариантов термометров, один из них – «шумовой термометр». Моль будет определяться фиксированным значением числа Авагадро.

В новой системе единиц величин SI семь базовых величин: ампер, кельвин, секунда, метр, килограмм, кандела и моль. Они уже непосредственно взаимосвязаны с фундаментальными физическими константами и практически неопределенность этих фундаментальных констант является той технической возможностью, которая может быть достигнута при формировании единиц величин.

Проведение реформы Международной системы единиц SI планируется завершить в 2018 году. Таким образом будет дан старт развитию новой метрической системы единиц. Это грандиозный этап в развитии метрологии и этого события с нетерпением ждёт все метрологическое сообщество.

Столь высокий уровень точности позволит решать многие проблемные задачи в области метрологии, которые сегодня находятся в стадии решения. Это связано с развитием наноэлектроники, наноразмерных величин, спелектроники и наноматематизма, терагерцовой метрологии и трехмерной нанометрологии.

#### **Промышленная метрология**

Теперь несколько слов о промышленной метрологии. Сегодня мы находимся в состоянии применения киберфизических систем, четвертой технической революции, которая называется Индустрия 4.0. Индустрия 4.0 – это концепция, которая поддерживается в первую очередь правительством Германии. Но, в принципе, подобные вещи сегодня работают и в США, и в Китае. Пришло понимание, что мы должны изменить модель производства, отказаться от жестких, конкретных схем решений, перейти к настраиваемым гиперпроизводствам, которые смогут работать точнее, быстрее, качественнее и с большим экономическим эффектом.

В этой ситуации перед метрологией стоит ряд задач, которые будут по оценкам экспертов определяться восьмью основными факторами. Доминирующую роль будет играть промышленный интернет, позволяющий функционировать всем звеньям в реальном масштабе времени. Для метрологии реализуется сложнейшая техническая задача проведения огромного количества измерений в реальном времени для принятия решений на основании этих измерений о состоянии процесса производства, об изменении и уточнении параметров с учетом всех воздействующих факторов, а также качества продукции. При этом потребуются синхронизация всех производственных звеньев, потому что речь будет идти не только о вертикальной, но и о горизонтальной интеграции, причем об интеграции автоматической – это тема управления и моделирования сложных производственных процессов.

У нас развитие получит дистанционная телеметрия, совместная обработка данных, новые сенсорные технологии, моделирование процессов,

использование численных алгоритмов, которые позволяют проводить измерения непосредственно в нужное время и в нужном месте. В этой ситуации мы должны понимать, каковы будут основные направления развития промышленной метрологии. С одной стороны – это точность, надежность, гибкость и комплексность. Но за этим стоит очень серьезная работа, связанная с цифровой интеграцией измерительных систем, где используются наноразмерные и сенсорные технологии.

Если говорить о каждом из этих аспектов коротко – это работа в режиме онлайн, получение очень большого количества результатов измерений, их оцифровка и принятие решений на основании этих результатов. И, естественно, мы должны говорить о понижении уровня неопределенности, повышении точности измерений и принятии решений о том, каков уровень неопределенности допустим при управлении теми или иными аспектами технологического процесса. Нужно принимать решения с учетом неопределенности измерений, причем допуски должны снижаться на уровне неопределенности измерений.

Если мы говорим о метрологии для Индустрии 4.0, то мы должны говорить об интеллектуальной метрологии, смарт-метрологии, которая должна оперировать большими базами данных и работать с алгоритмами нейронных сетей.

#### **Законодательная метрология**

Сегодня мы работаем в рамках Закона «Об обеспечении единства измерений», который находится в стадии пересмотра. В следующем году мы должны уже принять новую версию закона. Закон этот, с одной стороны, должен опираться на законодательство Евразийского союза, международных документов ИАС, МОЗМ и др., а с другой, позволить промышленности реализовывать проблемы Индустрии 4.0, он должен быть достаточно демо-

кратичен по отношению к промышленной метрологии. В закон будут включены новые новеллы. Одна из них – метрологическая прослеживаемость измерений, реализуемая как через национальные эталоны, так и стандартные образцы, референтные методики измерений, в отдельных случаях артефакты. Например, как один из артефактов – эталон концентрации озона. В этой сфере в любом случае придется пользоваться традиционными эталонами. Но их точность с учетом повышения точности всей базы измерений в любом случае будет повышена. Следующая новелла – вопрос проверки квалификации поверочных и калибровочных лабораторий. Поскольку только проверка квалификации как интегральный показатель качества может показать, насколько качественно работают лаборатории для оценки их результатов.

И еще один очень важный аспект – создание информационной системы.

Новые статьи, которые появятся в новом законе – это требования к измерениям, их результатам, стандартным образцам, референтным методикам выполнения измерений, государственному информационному фонду. Так, только через сличения мы сегодня можем доказывать сходимость и воспроизводимость наших национальных эталонов и те СМС-строки, которые получаем в международной базе данных KCDB BIPM. Но здесь нужно понимать, что как только мы перейдем к фундаментальным физическим эффектам, мы будем опираться только на фундаментальные физические эффекты в наших национальных эталонах.

Все обозначенные проблемы нашли отражение в разработанной и принятой Концепции развития государственной метрологической службы Республики Беларусь до 2020 года. В ней охвачены все аспекты развития метрологии – от законодательной части до прикладной технической.

**Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 504.064

**СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СТОЧНЫХ ВОД НА ФОНЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРИРОДНЫХ ТРЕНДОВ**

**Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И.**

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова  
Ижевск, Российская Федерация*

В условиях загрязнения природных водоемов изыскание более действенных средств контроля качества воды принимает первостепенное значение. Контроль, осуществляемый в режиме реального времени с помощью автоматических приборов, способствует более быстрому принятию решений и проведению мероприятий по устранению неблагоприятных воздействий на источники водоснабжения населения и проводится путем прямого измерения величин концентрации загрязнений с помощью определенных датчиков.

В процессе контроля, задача распознавания (классификации) уровней загрязнения заключается в отнесении объекта к тому или иному классу на основе прецедентной информации, заданной совокупностью объектов с известной классификацией. Объекты представлены своими признаковыми описаниями и могут быть представлены в самом разном виде (состояние, ситуация, процесс и т.д.).

Характерной чертой задачи распознавания является то, что решение о классификации уровня состояния необходимо принять на основе неформализованной, неполной, косвенной, разнородной, иногда противоречивой информации. Применение алгоритма распознавания позволяет прогнозировать негативные последствия и принимать адекватные решения для минимизации рисков и ущерба.

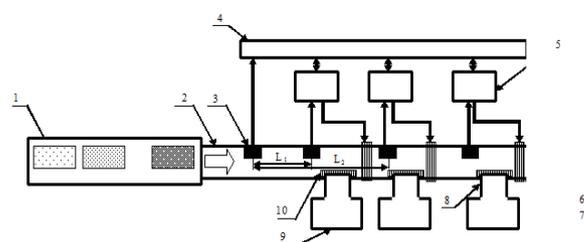
На основании изложенного, система мониторинга состояния сточных вод должна обладать следующими характеристиками:

- иметь многоуровневую иерархическую структуру;
- обеспечивать непрерывную информацию об изменении ключевых параметров состояния взаимодействующих водных сред;
- использовать многосенсорный бесконтактный подход с применением современных дистанционных, оптоэлектронных технических средств и методов;
- быть экономически эффективной и основанной преимущественно на отечественных комплектующих и технологиях.

Модификация системы мониторинга состояния сточных вод включает в себя  $N+1$  датчик,  $N+1$  блок обработки, и соответственно  $N+1$  отвод и блок утилизации. Устройство разделяет все загрязняющие жидкости в разные резервуары, не давая им смешиваться. Таким образом, нет никакой опасности для предприятий, на которых

содержатся опасные и взаимодействующие жидкости. Эффективность работы устройства повышается за счет уменьшения времени распознавания загрязнения на каждом датчике вследствие увеличения их количества и уменьшения диапазона оптической плотности.

На рисунке 1 приведена структурная схема системы мониторинга состояния сточных вод.



- 1 – контролируемые жидкости, 2 – основной канал,
- 3 – оптоэлектронные датчики, 4 – главный блок обработки,
- 5 – блоки обработки и управления, 6 – фильтр очистки,
- 7 – элементы блокировки основного канала, 8 – отводы (ответвления), 9 – блоки утилизации (отстойники),
- 10 – элементы блокировки канала

Рисунок 1 – Структурная схема системы длительного мониторинга состояния сточных вод

Система мониторинга состояния сточных вод работает с  $N+1$  типом загрязнений, где первое состояние – фоновое загрязнение. Она содержит канал 2 движения контролируемой среды (трубопровод), оптоэлектронные датчики 3, состоящие как минимум из одного источника и одного приемника излучения. С каждым из датчиков связаны блоки обработки и управления 5, а каждый блок обработки и управления связан с главным блоком обработки 4. От канала 2 отходят ответвления (отводы) 8, расположенные после каждого оптоэлектронного датчика. Элементы 7, 10 блокировки движения контролируемой среды (задвижки) установлены в канале 2 и отводах 8 соответственно. Управляющие входы элементов 7 и 10 соединены с выходами блоков обработки и управления 5. На выходе канала движения контролируемой среды установлен фильтр очистки 6, а на выходе каждого отвода 8 – блок утилизации 9 (резервуар, отстойник) загрязненной контролируемой среды [1].

Рассматриваемое устройство устранения аварийной ситуации представляет собой систему из  $N+1$  датчиков ( $n=0...N$ ), на каждом из которых происходит процесс распознавания загрязнения. Каждый датчик № $n$  ( $n=0...N$ ) характеризуется

своим диапазоном оптической плотности  $[P_{n_{\min}}; P_{n_{\max}}]$ , поэтому тип жидкости №*n* идентифицируется только датчиком №*n*. Заметим, что датчики №0 и №*N* являются вспомогательными: нулевой – для дальнейшего подсчета с учетом тренда фонового уровня загрязнения, последний – для сброса всех неидентифицируемых жидкостей. Их диапазоны являются максимальными и равны между собой.

Формализованный вид аварийных ситуаций для датчика №*n* представлен в системах неравенств, соответственно.

Первая ситуация: уровень загрязненности резко повысился и поддерживается в течение длительного времени

$$\begin{cases} \alpha_1 : P_{n_{\min}} \leq P_i \leq P_{n_{\max}}, \\ \alpha_2 : S_{n_{\min 1}} \leq S_{n_i} \leq S_{n_{\max 1}}, \\ \alpha_3 : T_{n_{\min 1}} \leq T_{n_i} \leq T_{n_{\max 1}}. \end{cases} \quad (1)$$

Вторая ситуация: уровень загрязненности колеблется, то возрастая, то убывая

$$\begin{cases} \beta_1 : P_{n_{\min}} \leq P_i \leq P_{n_{\max}}, \\ \beta_2 : S_{n_{\min 2}} \leq \sum_{l=1}^k S_{n_l} + S_{n_i} \leq S_{n_{\max 2}}, \\ \beta_3 : T_{n_{\text{уср}2}} \leq T_{n_l}, l \in [1, k], \\ \beta_4 : T_{n_{\min 2}} \leq \sum_{l=1}^k T_{n_l} + T_{n_i} \leq T_{n_{\max 2}}. \end{cases} \quad (2)$$

Третья ситуация: уровень загрязненности периодически меняется с высокого на нормальный, с нормального – на высокий

$$\begin{cases} \gamma_1 : P_{n_{\min}} \leq P_i \leq P_{n_{\max}}, \\ \gamma_2 : S_{n_{k \min}} \leq S_{n_k} \leq S_{n_{k \max}}, \\ \gamma_3 : S_{n_{\min 3}} \leq \sum_{l=1}^k S_{n_l} + S_{n_i} \leq S_{n_{\max 3}}, \\ \gamma_4 : T_{n_{\text{уср}3}} \leq T_{n_l}, l \in [1, k], \\ \gamma_5 : T_{n_{\min 3}} \leq \sum_{l=1}^k T_{n_l} + T_{n_i} \leq T_{n_{\max 3}}. \end{cases} \quad (3)$$

Для примера на рисунке 2 приведена временная диаграмма начала аварии для сплошного загрязнения.

Пункт 1 – оптоэлектронный датчик №0 уловил превышение оптической плотности контролируемой среды. Далее происходит слежение за длительностью и площадью предполагаемого загрязнения. Чтобы удостовериться в наличии загрязняющей жидкости, требуется время  $T_{\min}$  (пункт 2).

Если по истечении этого интервала данные о загрязнении (оптическая плотность, площадь) подтвердили его наличие, то наблюдение за ним

продолжится. Если же при прохождении интервала произошел спад значений параметров на фоновый нормальный уровень, слежение прекращается и возобновляется безаварийный режим.

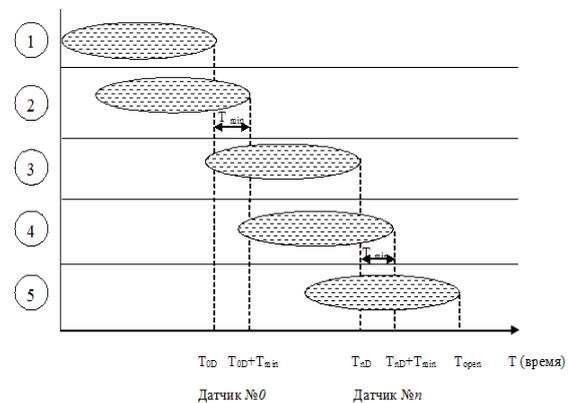


Рисунок 2– Временная диаграмма начала аварии

Пункт 3 – оптоэлектронный датчик №*n* уловил превышение оптической плотности контролируемой среды. Распознавание загрязнения пойдет аналогично первому датчику. При подтверждении наличия сгустка на датчике №*n* (пункт 4), устройство определяет расчетные параметры.

Пункт 5 – начинает открываться заслонка в ответвлении и одновременно начинает закрываться заслонка основного канала. Далее загрязнение отправляется в блок утилизации.

С использованием аналитических выражений и временных диаграмм разработаны блок-схема автоматизации устранения аварийных сбросов, функциональная схема, изготовлена лабораторная система мониторинга состояния сточных вод для выделения антропогенных факторов на фоне естественных природных трендов, разработана технология применения установки.

Проведенные исследования показали, что при проектировании систем управления аварийными сбросами в технологическом процессе очистки сточных вод и промышленных стоков, для успешного выявления и устранения аварийных ситуаций необходимо с помощью разработанных теоретических и методических основ учитывать фоновые значения загрязнений, тренд их изменения, существование корреляционных связей между оптической плотностью и другими параметрами, характеризующими содержание и виды загрязнений.

1. Патент №153362 РФ на полезную модель. МПК G01N15/06. Устройство устранения аварийного выброса / Алексеев В.А., Девятов Н.А., Юран С.И., Усольцев В.П. – Заявка на полезную модель 2014141487. – Дата подачи заявки: 14.10.2014. Опубликовано: 20.07.2015. Бюл. № 20.

**МЕТОД МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ ЖИДКОСТНЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ**

**Иванов В.И., Иванов Н.И.**  
 НИИ ядерных проблем БГУ  
 Минск, Республика Беларусь

Предложен метод многопараметровой диагностики двухфазных потоков различной природы, представляющих собой несущую фазу с дискретными включениями (ДВ): газовых пузырьков и различных частиц в водной несущей фазе, аэрозольных частиц в атмосфере, мелкоаэрозольного мусора и микрометеороидов в космическом пространстве, различного рода ДВ в аэродинамических потоках и жидкостных струях. Скорость потоков может достигать сотен метров в секунду с минимальными размерами ДВ 3–5 мкм. Метод позволяет одновременно определять скорость и размеры ДВ, а также истинную объемную концентрацию ДВ в несущей фазе потока. Реализация метода возможна на различных зондовых детекторах [1], однако наибольшая чувствительность метода, а также возможность диагностики высокоскоростных и высокотемпературных потоков достигается при использовании оптиковолоконных детекторов (ОВД). Диагностика двухфазных потоков осуществляется в непосредственной близости к приемно – излучающей апертуре  $A_d$  ОВД с использованием низкокогерентного излучения лазерных диодов с мощностью 1–5 мВт. При этом одиночный сенсор или матрицу ОВД располагают перпендикулярно вектору скорости  $\vec{W}_{p,i}$  диагностируемых потоков и анализируют длительности отраженных лазерных сигналов  $U_i(\tau)$  от одиночных ДВ в несущей фазе. В общем виде длительность  $\tau_i$  отраженного лазерного сигнала (импульса)  $U_i(\tau)$  от ДВ на выходе ОВД определяется соотношением

$$\tau_i = \tau_{f,i+} + \tau_{f,i-} + \tau_{p,i} = 2\tau_{f,i} + \tau_{p,i}, \quad (1)$$

где  $\tau_{f,i+}$ ,  $\tau_{f,i-}$  – длительности переднего и заднего фронтов импульса, обусловленных временами вхождения в зону апертуры  $A_d$  и выхода из зоны  $A_d$  ДВ, соответственно;  $\tau_{p,i}$  – время нахождения всего ДВ в зоне апертуры  $A_d$

$$\tau_{f,i} = \tau_{f,i+} = \tau_{f,i-} = A_d / \vec{W}_{p,i}, \quad (2)$$

$$\tau_{p,i} = (D_{p,i} - A_d) / \vec{W}_{p,i}, \quad (3)$$

$$\tau_i = 2A_d / \vec{W}_{p,i} + (D_{p,i} - A_d) / \vec{W}_{p,i}, \quad (4)$$

где  $D_{p,i}$  – линейный размер ДВ в направлении вектора скорости его движения  $\vec{W}_{p,i}$ ;  $A_d$  – диаметр апертуры ОВД,  $A_d \leq D_{p,i.min}$ .

Оценка длительности информационных импульсов  $U_i(\tau)$  осуществляется при двух параметрах дискриминации  $k_i$  по уровню

$$k_i = (U_{g,i} - U_{min,i}) / U_{m,i}; \quad k_2 = 1 - k_1, \quad (5)$$

где  $U_{g,i}$  – уровень дискриминации;  $U_{min,i}$  и  $U_{m,i}$  – минимальное значение и амплитуда  $i$ -того сигнального импульса  $U(\tau_i)$ , соответственно.  $U_{m,i} = U_{max,i} - U_{min,i}$  – амплитуда сигнального импульса.

С учетом  $k_i$ , отношение длительности фронтов сигнального импульса  $\tau_{f,i}(U_{g,i})$  на уровне дискриминации  $U_{g,i}$  к длительности фронтов импульса по его основанию  $\tau_f$  определяются отношением

$$\tau_{f,i}(U_{g,i}) / \tau_f = k_i U_{m,i} / U_{m,i} = k_i. \quad (6)$$

Из уравнения (2) с учетом уравнения (6) длительности фронтов сигнального импульса на произвольном уровне дискриминации можно представить в виде

$$\begin{aligned} \tau_{f,i}(U_{g,i}) &= \tau_{f,i+}(U_{g,i}) = \\ &= \tau_{f,i-}(U_{g,i}) \tau_{f,i} = k_i (A_d / W_{i,p}). \end{aligned} \quad (7)$$

На основании уравнений (4) и (7) длительность импульсов информационных сигналов  $\tau_i$  для различных значений  $k_i$ , равна

$$\tau_i(k_i) = D_{p,i} / W_{p,i} + A_d(2k_i - 1) / W_{p,i}. \quad (8)$$

В соответствии с условием (5)  $k_2 = 1 - k_1$  и уравнения (8) длительности сигнальных импульсов с параметрами дискриминации  $k_1$  и  $k_2$  соответственно равны

$$\tau_i(k_1) = D_{p,i} / W_{p,i} + A_d(2k_1 - 1) / W_{p,i}, \quad (9)$$

$$\tau_i(k_2) = D_{p,i} / W_{p,i} + A_d(1 - 2k_1) / W_{p,i}. \quad (10)$$

Значения скорости  $W_{p,i}$  и линейные размеры  $D_{p,i}$  ДВ (спектр размеров) определяются из уравнений (9) и (10) в виде

$$W_{p,i} = 2A_d(2k_1 - 1) / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)], \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{p,i} &= \{[\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)] / \\ &/ [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]\} \times A_d(2k_1 - 1). \end{aligned} \quad (12)$$

Истинное объемное содержание ДВ в несущей фазе на интервале измерения  $T$  определяется из уравнения (13)

$$\varphi = \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^n [\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)], \quad (13)$$

где  $n$  – число ДВ, прошедших через измерительную апертуру  $A_d$  за время  $T$ .

Важным вопросом оптимизации параметров ОВД является определенный выбор требуемой верхней граничной частоты  $f_{в.гр}$  полосы пропускания ОВД. Это связано с тем, что при занижении  $f_{в.гр}$  происходит «завал» фронтов сигнальных импульсов, что увеличивает погрешность определения параметров потока. С другой стороны при существенном превышении требуемой  $f_{в.гр}$  увеличиваются паразитные шумы. Известно, что при треугольной аппроксимации импульса с длительностью фронта  $\tau_f$  верхняя частота его частотного спектра определяется уравнением

$$f_{в.гр} = 1/0,35 \tau_f, \quad (14)$$

где  $\tau_f$  – длительность фронта импульса.

С учетом (2) уравнение (14) имеет вид

$$f_{в.гр} = W_p / 0,35 A_d. \quad (15)$$

На рис. 1 приведены расчетные зависимости требуемой верхней граничной частоты ОВД для многопараметровой диагностики двухфазных потоков в широком диапазоне скоростей, как функции скорости  $W_p$  и размера апертуры ОВД  $A_d$ , построенные по уравнению (15).

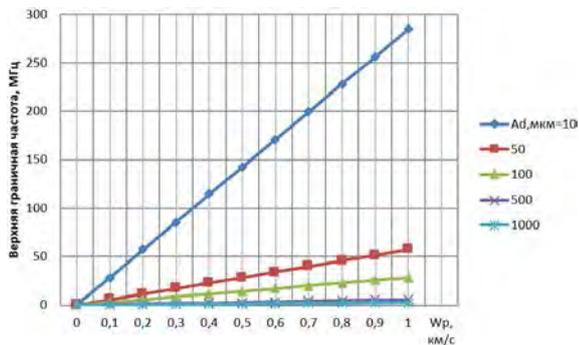


Рисунок 1 – Зависимость требуемой  $f_{в.гр}$  ОВД

Автоматизированная обработка данных ОВД требует представления выходных сигналов ВОД в дискретной форме. Выбор шага дискретизации данных сигналов по времени  $\Delta t$  при заданной ошибке квантования по уровню  $\Delta U$  является определяющим фактором для обеспечения высокой точности параметров парообразования. Согласно фундаментального принципа дискретизации процессов по теореме отсчетов (теорема Котельникова) с финитным спектром шаг дискретизации процессов с  $f_{в.гр}$  определяется формулой

$$\Delta t = 1/2f_{в.гр}. \quad (16)$$

Вместе с тем наблюдаемые импульсные сигналы ВОД не относятся к классу сигналов с финитным спектром, что препятствует

использованию данного критерия, так как это приводит к утрате ряда существенных информационных признаков сигналов ВОД.

Наиболее быстрыми компонентами данных сигналов являются фронты нарастания и спада импульсов ВОД. Точность измерения фронтов существенным образом влияет на точность измерения, как скорости, так и других параметров двухфазных потоков. Разработка методики выбора шага дискретизации  $\Delta t$  проведена по критерию измерения скорости с заданной относительной погрешностью

$$\delta_w = \frac{\Delta W}{W_p}, \quad (17)$$

где  $\Delta W$  – абсолютная погрешность измерения скорости (элемент разрешения по скорости).

Данную величину можно представить в виде

$$\delta_w = \frac{A_d}{W_p \tau_f n_d} = \frac{1}{n_d}, \quad (18)$$

где  $n_d$  – требуемое число точек дискретизации с равномерным шагом  $\Delta t$  по длительности  $\tau_f$ .

В этой связи

$$\Delta t = \tau_f \delta_w. \quad (19)$$

Из (19) в соответствии с (15) требуемый шаг дискретизации определяется уравнением

$$\Delta t = \frac{\delta_w}{0,35 f_{в.гр}}, \quad (20)$$

при заданной погрешности  $\delta_w$  с учетом верхней граничной частоты  $f_{гр}$  (рисунок 1) и апертуры детектора  $A_d$ . Размер апертуры ОВД  $A_d$  определяется диаметром сердцевины используемого световода  $A_d \cong D_{св}$  и выбирается из условий обеспечения требуемой разрешающей способности и обеспечения наилучшего соотношения сигнал /шум, которое при прочих равных условиях пропорционально отношению размеров (площадей) минимального ДВ  $D_{p.min}$  в потоке и апертуры ОВД  $D_{св}$ , т.е. отношением  $D_{p.min}/D_{св}$ . Реализация метода на базе ОВД позволяет диагностировать различные двухфазные потоки в широком диапазоне скоростей, включая высокотемпературные потоки с чувствительностью обнаружения и определения размеров ДВ на уровне 3–5 мкм. Малое энергопотребление, габариты и вес ОВД позволяют размещать их на минироботах, сверхмалых беспилотных летательных и подводных аппаратах, наноспутниках.

1. Пат. на изобретение 20072 Республика Беларусь. МПК G01N 27/06 (2006.01). «Способ определения истинного объемного паросодержания двухфазного потока в парогенерирующих каналах»/Иванов В.И., Иванов Н.И. 27.01.2016.

УДК 531.385

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОРСКИХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ С САМОНАСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА

Малютин Д.М.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

При установке гравиметра на гиросtabilизированную платформу (ГСП) для уменьшения погрешностей гравитационных измерений необходимо обеспечить высокую точность стабилизации ГСП относительно горизонта и добиться близости к нулю значения косинуса сдвига фазы между горизонтальными ускорениями качки и наклонами ГСП. Эффективность выполнения этих требований в свою очередь обусловлена структурой построения ГСП [1].

Передаточная функция ГСП с предлагаемой системой коррекции (СК) по каждому каналу имеет вид  $W(p) = \alpha(p) / W_z(p) = W_p(p) / (1 + gW_p(p))$ , где

$$W_p(p) = \frac{k_0(T_3p+1)(\frac{T_4}{l}p+1)(T_5p+1)(\frac{T_7}{l_2}p+1)(T_8p+1)}{(T_2^2p^2 + 2\xi T_2p + 1)(T_4p+1)(T_6p+1)(T_7p+1)(T_9p+1)p^2},$$

$\alpha(p)$  – погрешность стабилизации,  $W_z$  – горизонтальное ускорение качки,  $K_A$  – коэффициент передачи акселерометра,  $K_z$  – коэффициент передачи гироскопа по управляющему воздействию,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $T_2, T_3, K_2, T_4, l, T_5, T_6, T_7, l_2, T_8, T_9, \xi$  – параметры корректирующего устройства СК,  $k_0 = K_A \cdot K_2 \cdot K_z$ , сигнал с выхода акселерометра по каждому из двух каналов поступает на вход соответствующего устройства измерения спектра (УИС), в которых определяется преобладающие частоты качки  $\omega_{k1}, \omega_{k2}$ . Кроме того сигнал с выхода датчика угловой скорости, ось чувствительности которого перпендикулярна плоскости ГСП, поступает на вход УИС, в котором определяется преобладающая частота качки  $\omega_{k3}$ . Результирующее горизонтальное ускорение, обусловленное качкой и орбитальным движением корабля, измеряемое акселерометром первого канала СК, имеет следующие составляющие первого приближения:  $\ddot{\eta}$  – линейное ускорение орбитального движения центра тяжести корабля,  $\upsilon\dot{\phi}$  – ускорение, обусловленное рысканием и наличием хода корабля ( $\upsilon$  – скорость движения корабля,  $\dot{\phi}$  – угловая скорость рыскания корабля),  $x\cdot\ddot{\phi}$  – ускорение, обусловленное рысканием корабля ( $x$  – координата места установки прибора на корабле,  $\ddot{\phi}$  – угловое ускорение рыскания корабля),  $-z\cdot\ddot{\theta}$  – ускорение, обусловленное бортовой качкой корабля ( $z$  – координата места установки прибора на корабле,  $\ddot{\theta}$  – угловое ускорение бортовой качки корабля). Результирующее горизонтальное ускорение, обусловленное качкой и

орбитальным движением корабля, измеряемое акселерометром второго канала системы коррекции, имеет следующие составляющие первого приближения:  $\ddot{\xi}$  – линейное ускорение орбитального движения центра тяжести корабля,  $-y\cdot\ddot{\phi}$  – ускорение, обусловленное рысканием корабля ( $y$  – координата места установки прибора на корабле),  $z\cdot\ddot{\psi}$  – ускорение, обусловленное килевой качкой корабля ( $z$  – координата места установки прибора на корабле,  $\ddot{\psi}$  – угловое ускорение килевой качки корабля). Преобладающая частота  $\omega_{k1}$  результирующего горизонтального ускорения, измеряемого акселерометром первого канала системы коррекции, соответствует преобладающей частоте линейного ускорения орбитального движения центра тяжести корабля  $\ddot{\eta}$  или преобладающей частоте ускорения, обусловленного бортовой качкой  $-z\cdot\ddot{\theta}$ . Преобладающая частота  $\omega_{k2}$  горизонтального ускорения, измеряемого акселерометром второго канала СК, соответствует преобладающей частоте линейного ускорения орбитального движения центра тяжести корабля  $\ddot{\xi}$  или преобладающей частоте ускорения, обусловленного килевой качкой  $z\cdot\ddot{\psi}$ . Преобладающая частота  $\omega_{k3}$  составляющих результирующего горизонтального ускорения качки, обусловленных рысканием корабля  $x\cdot\ddot{\phi}$ ,  $-y\cdot\ddot{\phi}$  и составляющей, обусловленной рысканием и наличием хода корабля  $\upsilon\dot{\phi}$  лежит в низкочастотной области и по величине значительно меньше преобладающих частот  $\omega_{k1}, \omega_{k2}$ . Погрешности на частоте  $\omega_{k3}$  превалируют. Систематическая составляющая погрешности измерения ускорения силы тяжести из – за совместного влияния составляющей горизонтального ускорения, обусловленной рысканием корабля и наклоном ГСП в случае нерегулярной качки определяется по формуле

$$\overline{W_{z1}\alpha_1} = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Re}W(j\omega)S_{w_{z1}}(\omega)d\omega. \quad (1)$$

Спектральная плотность (СП) горизонтального ускорения, обусловленного рысканием корабля имеет вид

$$S_{w_{z1}}(\omega) = \frac{2A_\phi\mu_\phi x^2}{\pi} \frac{b_\phi^2\omega^4}{\omega^4 + 2a_\phi\omega^2 + b_\phi^4}, \quad (2)$$

где  $A_\phi$  – дисперсия углов рыскания,  $\mu_\phi$  – коэффициент нерегулярности,  $b_\phi^2 = \mu_\phi^2 + \omega_{k3}^2$ ,

$a_\phi = \mu_\phi^2 - \omega_{k3}^2$ . Систематическая составляющая погрешности измерения ускорения силы тяжести из – за совместного влияния составляющей горизонтального ускорения, обусловленной рысканием и наличием хода корабля и наклоном ГСП определяется по формуле

$$W_{\alpha_2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Re} W(j\omega) S_{w_{\alpha_2}}(\omega) d\omega. \quad (3)$$

СП горизонтального ускорения, обусловленного рысканием и наличием хода корабля имеет вид

$$S_{w_{\alpha_2}}(\omega) = \frac{2A_\phi \mu_\phi v^2}{\pi} \frac{b_\phi^2 \omega^2}{\omega^4 + 2a_\phi \omega^2 + b_\phi^4}, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость хода корабля. При числовых значениях параметров каналов предлагаемого устройства СК  $k_0 = 1,3 \cdot 10^{-5}$ ,  $\xi = 0,707$ ,  $T_3 = 150$ ,  $T_2 = 17$  и параметрах  $T_4 = 7,033528662$ ,  $l = 2,160922022$ ,  $T_5 = 1,083643444$ ,  $T_6 = 0,922812762$ ,  $T_7 = 4,941269339$ ,  $l_2 = 1,066521529$ ,  $T_8 = 1,012982185$ ,  $T_9 = 0,987184193$ , которые определены на основании критериев самонастройки (5)–(8), значение ФЧХ передаточной функции ГСП становится не только точно равным  $-270^\circ$  на частотах  $\omega_{k1}, \omega_{k2}$ , но и с высокой точностью стремится к  $-270^\circ$  на частоте качки  $\omega_{k3}$  в отличии от ГСП, рассмотренной в работе [2].

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta Q_1 &= -90^\circ + \text{arctg}(T_3 \omega_{k3}) - \text{arctg}\left(\frac{2\xi T_2 \omega_{k3}}{1 - (T_2 \omega_{k3})^2}\right) - \\ l &= \frac{1 + \sin|\Delta Q_1|}{1 - \sin|\Delta Q_1|}, T_4 = \frac{1}{\omega_{k3}} \sqrt{l}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta Q_2 &= -90^\circ + \text{arctg}(T_3 \omega_{k1}) - \text{arctg}\left(\frac{2\xi T_2 \omega_{k1}}{1 - (T_2 \omega_{k1})^2}\right) - \\ &- \text{arctg}(T_4 \omega_{k1}) + \text{arctg}\left(\frac{T_4}{l} \omega_{k1}\right) \\ l_1 &= \frac{1 + \sin|\Delta Q_2|}{1 - \sin|\Delta Q_2|}, T_5 = \frac{1}{\omega_{k1}} \sqrt{l_1}, T_6 = \frac{T_5}{l_1}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

УДК 681.3

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА МУЗЫКАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

**Пономарева Н.В.**

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова  
Ижевск, Российская Федерация*

Методы и алгоритмы компьютерной (цифровой) обработки различного рода сигналов – (ЦОС) (*Digital Signal Processing – DSP*) играют важнейшую роль в информационных (компьютерных) технологиях (ИТ) (*Information Technology – IT*), в том числе и в компьютерных музыкальных технологиях.

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta Q_3 &= -90^\circ + \text{arctg}(T_3 \omega_{k3}) - \text{arctg}\left(\frac{2\xi T_2 \omega_{k3}}{1 - (T_2 \omega_{k3})^2}\right) - \\ &- \text{arctg}(T_4 \omega_{k3}) + \text{arctg}\left(\frac{T_4}{l} \omega_{k3}\right) - \text{arctg}(T_6 \omega_{k3}) + \\ &+ \text{arctg}(T_5 \omega_{k3}), l_2 = \frac{1 + \sin|\Delta Q_3|}{1 - \sin|\Delta Q_3|}, T_7 = \frac{1}{\omega_{k1}} \sqrt{l_2}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta Q_4 &= -90^\circ + \text{arctg}(T_3 \omega_{k1}) - \text{arctg}\left(\frac{2\xi T_2 \omega_{k1}}{1 - (T_2 \omega_{k1})^2}\right) - \\ &- \text{arctg}(T_4 \omega_{k1}) + \text{arctg}\left(\frac{T_4}{l} \omega_{k1}\right) - \text{arctg}(T_6 \omega_{k1}) + \\ &+ \text{arctg}(T_5 \omega_{k1}) - \text{arctg}(T_7 \omega_{k1}) + \text{arctg}\left(\frac{T_7}{l_2} \omega_{k1}\right) \\ l_3 &= \frac{1 + \sin|\Delta Q_4|}{1 - \sin|\Delta Q_4|}, T_8 = \frac{1}{\omega_{k1}} \sqrt{l_3}, T_9 = \frac{T_8}{l_3}. \end{aligned} \right. \quad ; (8)$$

При  $\omega_{k1} = 1c^{-1}$ ,  $\omega_{k3} = 0,209c^{-1}$  (и для значений параметров СП горизонтального ускорения  $A_\phi = 0,000847 \text{ rad}^2$ ,  $\mu_\phi = 0,03c^{-1}$ ,  $x = 10\text{м}$ ,  $v = 10\text{м/с}$ ) погрешности составили  $W_{\alpha_1} = -0,000337$  мГал,  $W_{\alpha_2} = -0,058$  мГал. Таким образом, реализация предложенной в работе СК, позволяет обеспечить повышенную точность измерения ускорения силы тяжести.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
РФФИ. Грант №17-08-00434 А.*

1. Ривкин С.С., Береза А.Д. Гироскопическая стабилизация морских гравиметров. – М.: Наука, 1985. – 176 с.
2. Малютин Д.М. Распопов В.Я. Исследование динамики гиросtabilизатора морского гравиметра с самонастройкой параметров. – Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып.7., 2017. – С. 97–105.

числе семантической (смысловой) и эстетической (эмоциональной)) переносимых сигналами, осуществляется восприятие музыкальной информации, управление сложными системами (естественного и искусственного происхождения), а также организуется их функционирование.

Системный анализ методов и алгоритмов ЦОС, спектра их приложений в различных областях науки и техники, выявил ведущую роль классических методов спектральной обработки сигналов [1]. Данный класс компьютерных методов основан на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) (*Discrete Fourier Transform – DFT*) и алгоритмах быстрого его вычисления – алгоритмах быстрого преобразования Фурье (БПФ) (*Fast Fourier Transform – FFT*).

Эффективность и результативность приложений этого класса методов объясняется целым рядом причин, главная из которых – адекватность математического аппарата ДПФ структуре различного вида сигналов – музыкально-акустических, виброакустических, речевых, биомедицинских, гидроакустических и многих других, что позволяет получить наглядную физическую интерпретацию и толкование полученных результатов.

Однако практика применения классических методов компьютерной обработки сигналов в частотной, временной и частотно-временной областях, выявила кроме существенных достоинств данных методов и ряд их принципиальных недостатков, проявляющихся в виде нежелательных эффектов наложения, частотокола, утечки, гребешкового эффекта, как во временной, так и в частотной областях [1].

Для решения задач проблематики классических методов спектральной ЦОС в работах [2–4] предложено множество полных, ортогональных, параметрических экспоненциальных базисных систем, на основе которых разработано обобщение ДПФ в виде параметрического ДПФ (ДПФ-П). Данное преобразование существенно расширило функциональные возможности классических методов ЦОС, пополнило их математический инструментарий, сохранив при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкование получаемых результатов.

#### Алгебраическая форма ДПФ-П:

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n}, \quad k = \overline{0, N-1}; \quad 0 \leq \theta < 1, \quad (1)$$

где  $x(n)$  – дискретизированный во времени сигнал,  $n = \overline{0, N-1}$ ;  $\theta$  – параметр ДПФ-П,  $0 \leq \theta < 1$ ;  $S_N(k, \theta)$  – коэффициенты ДПФ-П, совокупность которых определяет амплитудно-частотный и фазо-частотный спектры ДМАС (коэффициенты ДПФ-П, также как и коэффициенты ДПФ, часто называют бинами<sup>1</sup>;

$$W_N = \exp(-j \frac{2\pi}{N}), \quad k = \overline{0, (N-1)}.$$

Проведенный автором настоящей работы системный анализ методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических сигналов<sup>2</sup> (МАС) и вокально-инструментальных фраз<sup>3</sup> (ВИФ), показал, что, с одной стороны, МАС и ВИФ могут быть описаны математическими моделями в виде суммы ангармонических сигналов<sup>4</sup> (вокал, звуки музыкальных инструментов) и шумовых музыкальных сигналов (звуки маракасов, щеток и т.п.), с другой – выявил широкое применение классических методов спектральной обработки на основе ДПФ, которые, как указано выше, обладают не только существенными достоинствами, но и принципиальными недостатками.

Таким образом, налицо важная и актуальная научная задача разработки новых и совершенствования существующих методов, алгоритмов и средств компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических, а также разработки быстрых процедур их реализации.

Автором была предложена гипотеза эффективного (то есть с получением обладающих новизной результатов) решения указанной важной и актуальной научной задачи путем разработки новых и совершенствования существующих методов, алгоритмов и средств компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических, а также разработки быстрых процедур их реализации на основе параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П), которое является обобщением ДПФ.

Параметры компьютерной спектральной обработки МАС:

- частота дискретизации МАС – 44100 Гц;
- число разрядов АЦП – 16;
- длительность МАС – 1024 отсчета;
- значения параметра  $\theta$ :  $-\theta = k/16, k = \overline{0, 15}$ .

<sup>1</sup> Отдельные коэффициенты (отсчеты) ДПФ-П называют также бинами («Bin» – в переводе с английского «хранилище», «ларь»), что подчеркивает тот факт, что энергия сигнала под кривой  $\sin(N \cdot x/2) / [N \cdot \sin(x/2)]$  (передаточная характеристика фильтра ДПФ-П) попадает в «хранилище» данного коэффициента ДПФ-П.

<sup>2</sup> Музыкально- акустические сигналы (МАС) – звуковые сигналы, используемые в музыке.

<sup>3</sup> Вокально-инструментально фраза (ВИФ) (от греч. *praxis* - выражение, способ выражения) – обособленная единица музыкально-акустического сигнала (музыкальной речи), занимающая промежуточное положение между мотивом и

предложением; ВИФ, представляет собой средство вокально-инструментальной выразительности, обычно отделяется от соседних построений *цезурой*, выраженной средствами мелодики, гармонии, метроритма, фактуры, но отличается от предложений и периодов сравнительно меньшей завершенностью.

<sup>4</sup> Ангармонический сигнал – периодический сигнал, представляющий собой сумму основного гармонического сигнала (гармонического сигнала наименьшей частоты) и некоторых его гармоник (гармонических сигналов более высоких частот, частоты которых кратны частоте основного гармонического сигнала).

Для примера на рисунке 1 приведен результат компьютерной спектральной обработки МАС ноты «до», сыгранной на музыкальном инструменте – альт.

Зона неопределенности МАС и его спектров обозначена ступенькой

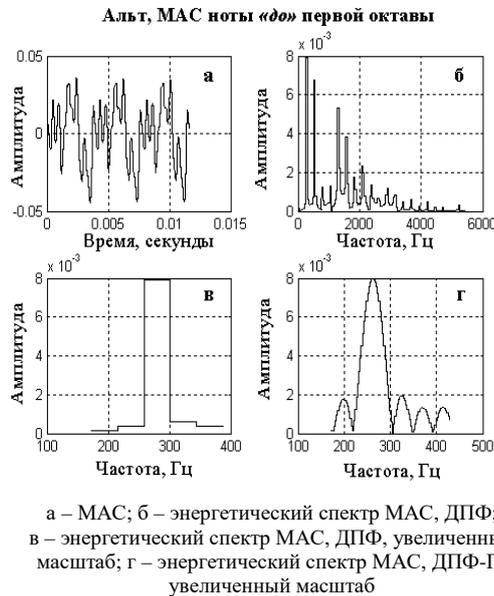


Рисунок 1 – Компьютерная спектральная обработка МАС ноты «до» первой октавы (альт)

Результаты экспериментальных исследований выделения основного тона (ОТ) МАС различных музыкальных инструментов (пианино, флейта, кларнет, скрипка, альт, электрическая гитара, труба, тромбон, гобой) подтвердили правильность выбора ДПФ-П в качестве основы новых методов, алгоритмов и средств выделения ОТ.

1. Пономарева, О.В. Развитие теории и разработка методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье: дис. д-ра техн. наук: 05.13.01 / Пономарева Ольга Владимировна. – Ижевск, 2016. – 357 с.
2. Пономарева, Н.В. Повышение точности и расширение функциональных возможностей цифровых фильтров на основе частотной выборки / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 114–119.
3. Пономарева, О.В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 31–38.
4. Пономарева, Н.В. Предобработка дискретных сигналов при спектральном анализе в системе компьютерной математики MATLAB / Н.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4 (31). – С. 32–34.

УДК 681.3

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСКРЕТНЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

**Пономарева О.В.**

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова  
Ижевск, Российская Федерация*

Рассмотрим важную и актуальную проблему дискретных косвенных измерений (ДКИ) – **проблему разграничения измерительных и вычислительных процедур**, которая существует, в том числе, и при определении спектра дискретных сигналов на конечных интервалах.

На конечном интервале длительностью в  $N$  отсчетов дискретный электрический измерительный сигнал (ДЭИС)  $x(n)$ ;  $0, (N-1)$ , можно представить (при выборе, дискретной базисной системы Фурье) в виде суммы ортогональных электрических сигналов с определенными амплитудами, частотами и фазами.

Совокупность значений параметров этих ортогональных электрических сигналов, принято называть соответствующим **спектром ДЭИС** в выбранной базисной системе [1,2].

В качестве базисных систем могут быть использованы различные дискретные базисные системы: Виленкина – Крестенсона (ВКФ) Уолша, Адамара, Лежандра.

На практике наибольшее применение получила базисная система Фурье, в основе

которой лежат дискретные экспоненциальные функции Фурье (ДЭФ):

$$\begin{aligned} def(p, l) &= \exp(-j \frac{2\pi}{N} pl) = W_N^{pl} = \\ &= \cos(\frac{2\pi}{N} pl) - j \sin(\frac{2\pi}{N} pl); p, l = \overline{0, N-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Данная базисная система позволяет измерить амплитудный и фазовый спектры на определенных частотах методом дискретного преобразования Фурье (ДПФ) ДЭИС

$$\begin{aligned} S_N(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}; \\ k &= \overline{0, (N-1)}; W_N = \exp(-j2\pi / N), \end{aligned} \quad (2)$$

$S_N(k)$  – коэффициенты (бины) ДПФ (спектр).

Отметим, что благодаря свойству мультипликативности базисной системы Фурье возможно построение быстрых измерительных преобразований в частотной и частотно-временной областях – алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1].

Отметим, что и в настоящее время поиск (синтез) наиболее адекватных измерительным задачам базисных систем является важной и актуальной задачей ДКИ. Так в монографии [3], посвященной основам теории линейных косвенных измерений параметров сложных дискретных сигналов, заданных конечным числом отсчетов, во временной, частотной и частотно-временной областях, предложено обобщение классического дискретного преобразования Фурье в виде параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П)

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n}; \quad (3)$$

$$k = \overline{0, (N-1)}; 0 \leq \theta < 1,$$

$S_N(k, \theta)$  – коэффициенты (бины) ДПФ-П (спектр).

В монографии автора [3] доказана мультипликативность базисной системы параметрических ДЭФ (ДЭФ-П)

$$\text{def}_p(p, l) = \exp(-j \frac{2\pi}{N} (p + \theta)l) = W_N^{(p+\theta)l} \quad (3)$$

$$p, l = \overline{0, N-1}; 0 \leq \theta < 1,$$

а также существование алгоритмов быстрого параметрического преобразования Фурье (БПФ-П) и скользящего ДПФ-П [4].

Применительно к определению спектра ДЭИС проблему разграничения измерительных и вычислительных преобразований можно сформулировать как ответ на вопрос: **спектр – это результат измерения или результат процедуры обработки измерений, т.е. результат вычислений?**

Ответ на данный важный и актуальный вопрос, приобретающий на современном этапе развития информационных технологий (ИТ) (*Information Technology – IT*) все большее значение, в зарубежной и отечественной научной и учебной литературе диаметрально противоположен.

За рубежом общепринято считать, что **спектр** является результатом измерения, а спектральный анализ определяется как **«измерение, которое дает точные или приближенные значения Z-преобразования дискретного сигнала для определенных значений z»** [1].

Если положить  $z = \exp(j2\pi/N)$  и считая ДЭИС, заданный на  $N$  – интервале периодическим, приходим к измерению частотных спектров электрических сигналов методом дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Если определять спектр в скользящем окне приходим к измерению частотно-временных спектров методом скользящего ДПФ [1].

Диаметрально противоположный подход мы наблюдаем в отечественной научной и учебной литературе [2, 5], где **спектр** относят не к измерениям, а к результату обработки измерений т.е.

результату вычислений. Отметим также, что в зарубежной технической литературе ДПФ **по определению считается измерительным преобразованием, а не вычислительным преобразованием**, как это принято в отечественной научной и учебной литературе. По мнению автора различный подход объясняется, прежде всего, тем, что за рубежом при измерении параметров дискретных сигналов, их спектров, ДПФ включается **непосредственно в состав измерительной процедуры**. Поэтому ответ на важный вопрос, который присутствует по умолчанию в отечественной учебной и монографической литературе, является ли ДПФ (2) и ДПФ-П (3) измерительными преобразованиями, по мнению автора, очевиден и однозначен – если ДПФ или ДПФ-П в составе измерительных цепей, то это **измерительные преобразования**, если нет, то это **вычислительные преобразования**.

Необходимость разрешения проблемы разграничения измерительных и вычислительных процедур, встала особо остро с появлением новой информационной технологии – **технологии виртуальных приборов**, разрабатываемых, например, в программно-инструментальной среде LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Отметим, что термин виртуальный прибор (*ВИ, англ. VI – Virtual Instruments*) не вполне удачен, так как может вводить в заблуждение.

Измерительные средства (ИС), разработанные по данной технологии, не являются виртуальными в истинном понимании этого слова и имеют дело с реальными ДЭИС. Появление термина **«виртуальный»** в названии средства ЦОИС объясняется технологией виртуальной (компьютерной) имитации реальных физических приборов, ИС математическими и программными методами. И для решения вопросов метрологии (теоретической, законодательной, практической) ВИ необходимо разграничение измерительных и вычислительных процедур.

В заключение отметим, что отнесение спектра к результатам обработки измерений ДЭИС, а не измерению нельзя признать корректным. Поясним это. В практике косвенных измерений [2, 5] достаточно давно известны, **линейные косвенные измерения**. В данном виде измерений искомое значение физической величины  $Q$  находят на основании известной линейной функциональной зависимости

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot Q_i, \quad (4)$$

где  $b_i$  – постоянный коэффициент  $i$ -го аргумента  $Q_i$  ( $Q_i, i = \overline{1, m}$  – значения физических величин, полученные при прямых измерениях);  $m$  – число аргументов.

Сравнивая (4) с (2) (3) нетрудно видеть, что каждое  $k$ -е,  $k = \overline{0, (N-1)}$ , значение коэффициента (бина) ДПФ, ДПФ-П (каждое значение частотного

спектра на определенной нормализованной частоте  $2\pi \cdot k / N$  или  $2\pi \cdot (k + \theta) / N$  представляет собой обычное линейное косвенное измерение, в котором в качестве функциональной зависимости используется  $k$ -я дискретная базисная функция ДПФ определенной частоты –  $k$ -я ДЭФ.

1. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. / под ред. Ю.Н. Александрова. М.: Мир, 1978. – 835 с.
2. Анциферов, С.С. Общая теория измерений: учебное пособие / С.С. Анциферов, Б.И. Голубь; Под ред.

- акад. РАН Н.Н. Евтихеева. –М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 176 с.
3. Пономарева, О.В. Основы теории дискретных косвенных измерений параметров сигналов / О.В. Пономарева – Ижевск: Издательство ИЖГТУ, – 2016. 172 с.
4. Пономарева, О.В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Автотриметрия. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 31–38.
5. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: учебное пособие для вузов – М.: Логос, 2002.– 408 с.

УДК 615.847+616.895.4

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕВОЖНО-ДЕПРЕССИВНЫХ РАССТОЙСТВ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ

Цокота М.В.<sup>1</sup>, Тымчик Г.С.<sup>1</sup>, Терещенко Н.Ф.<sup>1</sup>, Чухраев Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», <sup>2</sup>Научно-методический центр «Мединтех»  
Киев, Украина

Регистрация электрической активности мозга давно применяется для изучения нейрофизиологических основ тревожных состояний. Уже первые исследования расстройств методом электроэнцефалографии (ЭЭГ), проведенные в сороковые годы XX века, обнаружили неожиданно большое количество аномалий у пациентов. Обобщенные литературные данные свидетельствуют, что даже при «рутинном» визуальном анализе ЭЭГ, патологические признаки проявляются в 20-40% депрессивно-подавленных пациентов и при оценке их тревожных состояний [1]. Применение современных методов математического анализа и обработки ЭЭГ-данных еще больше увеличивает диагностическую значимость метода. Пригодность данных количественного анализа ЭЭГ для выявления депрессий, то есть их чувствительность и специфичность, составляют 72-93% и 75-88% соответственно. Более того, мировая неврология рекомендовала математический анализ ЭЭГ в качестве дополнительного инструмента дифференциации депрессивных больных от здоровых, но в большей степени изменения касаются одного из основных ритмов ЭЭГ - альфа-ритма, который привлекает высокое внимание исследователей, благодаря его высокой чувствительности к различным внешним воздействиям и тонким изменениям функционального состояния коры головного мозга [1].

Исследование альфа-ритма ЭЭГ больных нервными расстройствами, тревожно-депрессивным синдромом, на начальных этапах, позволяет изучать биологические основы заболевания и способствует недопущению усиления заболевания.

Поскольку ЭЭГ отражает разность потенциалов между двумя точками на поверхности головы, то для выяснения активности отдельных корковых областей используют индифферентный электрод, помещенный чаще всего на мочке уха. Это так называемое монополярная отвода. Вместе с этим

анализируется разность потенциалов между двумя активными зонами (биполярное отведение). Независимо от способа регистрации в ЭЭГ выделяются следующие типы ритмических колебаний: дельта - ритм ниже 4 Гц; тета-ритм 4–8 Гц; альфа-ритм 8–13 Гц (это основной ритм ЭЭГ, преимущественно выраженный в каудальных отделах коры – затылочный и теменной) бета-ритм 13–35 Гц; гамма-ритм – выше 35 Гц.

Эти ритмы отличаются не только по своим частотными, но и функциональными характеристикам. Их амплитуда, топография, соотношение является важным диагностическим признаком и критерием функционального состояния различных областей коры головного мозга при реализации психической деятельности.

Проведение ЭЭГ исследование имеет важное диагностическое значение при многих психических заболеваниях. ЭЭГ используется в диагностике тревожно-депрессивных расстройств (ТДР), эпилепсии и других психических расстройств, позволяет оценить глубину коматозных состояний, контролировать уровень сознания при наркозе.

Определение не решенных ранее частей общей проблемы. При обычной ЭЭГ патологию можно выявить только в 50% или меньше пациентов. Отсутствие изменений не исключает наличия отклонений от нормы. Повысить информативность ЭЭГ до 90% можно с помощью выполнения повторных исследований, длительной по времени регистрации ЭЭГ и тому подобное. Тщательное исследование функционального состояния головного мозга требует непрерывной диагностики. Многоканальной диагностикой ЭЭГ можно выявить пораженную зону, и она нуждается в постоянных или амбулаторных исследований. Поэтому при выявленном вероятном заболевании целесообразной является локализация измерения с проведением в дальнейшем биполярной регистрации ЭЭГ из

обособленных точек. При подтверждены хронического состояния болезней необходима частотная корреляция ритмов соответствующих областей по известным частотными паттерграммы.

Для выявления особенностей альфа-ритма ЭЭГ и установления возможных нервных расстройств исследована контрольная группа из 16 здоровых студентов для добровольного наблюдения. Диагностика проводилась по критериям МКБ-10. ЭЭГ регистрировали в состоянии спокойного бодрствования с помощью аппаратного комплекса KL-720 (Тайвань).

Запись ЭЭГ осуществлялся монополярного соответственно международной системе «10–20%».

В качестве референтного электрода были использованы ушные клипсы.

Частотно-амплитудные характеристики и топографические распространения ритмов ЭЭГ определяли с помощью спектрального анализа ЭЭГ методом быстрого преобразования Фурье с усреднением не менее 30 зон по 2 секунды.

Математическая обработка результатов. По данным исследований рассчитывался доверительный интервал значений альфа-ритма здоровых пациентов, как задача при малом количестве наблюдений, когда значение параметра  $a$  заменялось его точечной оценкой  $\tilde{a}$ . Тогда для вероятности  $\beta = 0,99$  находится значение  $\varepsilon$

$$P(|\tilde{a} - a| < \varepsilon) = \beta. \quad (1)$$

Диапазон практически возможных значений ошибки, возникающей при замене  $a$  на  $\tilde{a}$ , будет  $\pm \varepsilon$ , значительные по абсолютной величине погрешности будут появляться только с малой вероятностью  $\lambda = 1 - \beta$

$$P(\tilde{a} - \varepsilon < a < \tilde{a} + \varepsilon) = \beta. \quad (2)$$

Данное соотношение означает, что с вероятностью  $\beta$  неизвестное значение параметра  $a$  попадает в интервал:

$$I_{\beta} = (\tilde{a} - \varepsilon; \tilde{a} + \varepsilon). \quad (3)$$

Анализ полученных результатов. При попадании измеренной характеристики спектральной мощности альфа-ритма в доверительный интервал  $I_{\beta}$ . ЭЭГ подопытного считается здоровым. В противном случае проводится дополнительный расчет попадания доверительных границ  $a - \varepsilon$  и  $a + \varepsilon$  к доверительного интервала  $I_{\beta}$ .

Резкое снижение индекса альфа-ритма (ниже 10%) или полное отсутствие его, доминирование плоской ЭЭГ, полиритмия амплитудой до 25 мкВ, доминирование низкочастотного бета-ритма средних амплитуд (20–25 мкВ), умеренная выраженность высокочастотной регулярной компоненты, увеличение амплитуды альфа ритма более 100 мкВ со снижением частоты его ниже 9 Гц с переходом его в спектр альфа-образного тета-ритма, а так же с наличием частных проявлений или всплеск медленных ритмов даже при

умеренно возбужденного реактивной ЭЭГ рассматривается нарушением средней тяжести.

Пример графика спектральной плотности мощности для отдельного канала записи ЭЭГ приведен на рис. 1, где оси абсцисс частота сигнала (Гц), а на оси ординат - спектральная мощность.

В качестве характерных признаков сигнала  $x(n)$  в данном случае выступают значения суммарной спектральной плотности мощности в частотных диапазонах 1-4 Гц (Дельта-ритм) 4-8 Гц (тета-ритм) 8-13 Гц (альфа-ритм) 14-35 Гц (бета-ритм).

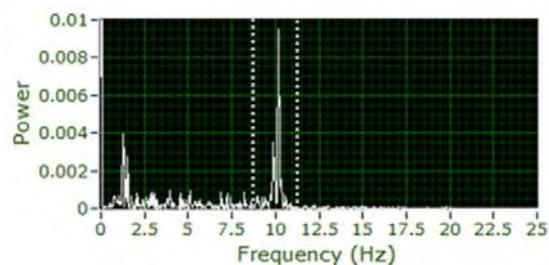


Рисунок 1 – Спектральная плотность мощности альфа-ритма и доверительный интервал

При анализе спектра для группы испытуемых студентов было установлено доверительный интервал в диапазоне от 9,25 до 11,5, изображенный на рис.1 пунктирными линиями.

Нами была разработана методика установления наличия психических расстройств путем аппаратного анализа ЭЭГ с выделением альфа-ритма и использованием корреляционных методов анализа с последующей терапией [2].

Таким образом, проведя исследование ЭЭГ испытуемых студентов было установлено наиболее здоровые пределы частоты альфа-ритма, выполнены исследования альфа-ритма ЭЭГ с применением спектрального анализа позволило выявить у подопытных студентов частичные психологические отклонения и незначительные нервные расстройства особой мозаики межкорковых взаимодействий и установить наиболее здоровые пределы частоты альфа-ритма. Терапевтическая стимуляция уменьшает отклонения от нормы в два раза. Метод корреляционно-экстремального анализа дал возможность аппаратно определить начальную наличие отклонений от нормы, а соответственно сигнал терапевтического действия на височную области головного мозга стимулировал процессы восстановления нормы.

1. Цокота М.В., Тимчик Г.С., Терещенко М.Ф., Вислоух С.П., Чурхасев М.В. Особливості обробки електроенцефалографічних сигналів для діагностики та корекції тривожно-депресивних розладів у студентів // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука», Київ, 2017 р. – 67–72 с.
2. Терещенко М.Ф., Чурхасев М.В., Тимчик Г.С., Цокота М.В., Вислоух С.П., Яковенко І.О. Спосіб діагностики та лікування психічних розладів // Патент України на корисну модель заявка №116897, від 12 червня 2017 р., Бюл.№11.

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Пономарев В.А., Пономарева О.В., Пономарев А.В., Пономарева Н.В.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова  
Ижевск, Российская Федерация

Одной из важнейших задач обеспечения повышения качества продукции является получение точных и достоверных знаний о состоянии объектов, свойствах явлений и процессов методами и средствами измерений.

На практике большинство различного рода физических величин, характеризующих состояние объекта измерения<sup>1</sup> в той или иной предметной области, преобразуются в процессе измерений в цифровые электрические измерительные сигналы<sup>2</sup> (ЦЭС), параметры которых содержат количественную информацию об измеряемых физических величинах и функционально с ними связаны.

На современном этапе развития измерительных и информационных технологий происходит интенсивный переход на методы и средства, основанные на процессных прямых измерениях (ПрПИ) и процессорных косвенных измерениях (ПрКИ) параметров ЦЭС. Это связано с тем, что данный вид измерений<sup>3</sup> обладает целым рядом преимуществ: малым временем измерения, большей функциональностью, гибкостью, диапазонностью, гарантированной точностью и идеальной воспроизводимостью, а также сохранением (в достаточно широких пределах) метрологических характеристик при изменении условий измерений (температуры, влажности, давления и др.).

На современном этапе ПрПИ и ПрКИ играют ключевую роль в повышении качества выпускаемой продукции, и наблюдается постоянное расширение как спектра их приложений методов и средств, так и спектра предметных областей, в которых они применяются.

В зависимости от конкретной предметной области ЦЭС имеют разную информационную природу.

*При виброакустическом функциональном диагностировании машин и механизмов* вибрации от зарождающихся дефектов с помощью

датчиков вибрации преобразуются в *виброакустический электрический сигнал*, измеряемые параметры<sup>4</sup> которого позволяют проводить безразборное диагностирование объекта [1].

*В медицинской компьютерной диагностике* процессорные измерения временных и частотных параметров электрических биомедицинских сигналов являются важным инструментом объективного оценивания функционального состояния человека [2].

*В пассивных гидролокационных системах* процессорные измерения параметров гидроакустических сигналов играют важную роль при обнаружении и классификации надводных и подводных кораблей [3].

Целью настоящей работы является выявление тенденций развития процессорных измерений параметров ЦЭС в различных предметных областях, их системный анализ и постановка актуальных задач в данной области измерений, которые имеют важное научное и прикладное значение.

Системный анализ приложений процессорных измерительных средств (ПрИС) параметров ЦЭС позволяет сделать следующие выводы:

➤ Во-первых, измерительные приборы<sup>5</sup> ДКИ всегда являются частью некоторой измерительной системы<sup>6</sup> (ИС), которые являются более сложными техническими системами.

➤ Во-вторых, совокупность параметров ЦЭС, характеризующих объект измерения, применяемые методы и средства их измерения, требования к функциональным возможностям и метрологическим характеристикам измерительных приборов определяются, прежде всего, задачами, стоящими в целом перед ИС, и условиями решения этих задач.

В качестве примера, иллюстрирующего эти выводы можно привести обобщенную функцио-

<sup>1</sup> **Объект измерения** – тело (физическая система, процесс, явление и т.д.), которое характеризуется одной или несколькими измеряемыми физическими величинами (РМГ 29 – 99).

<sup>2</sup> **Измерительный сигнал** – сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине (РМГ 29 – 99).

<sup>3</sup> **Вид измерений** – часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин (РМГ 29 – 99).

<sup>4</sup> **Измеряемые параметры** – физические величины, наилучшим образом отражающие качество изделий или процессов (РМГ 29 – 99).

<sup>5</sup> **Средство измерений** – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

<sup>6</sup> **Измерительная система** – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях (РМГ 29 – 99).

нально-структурную схему ИС виброакустического функционального диагностирования объектов, разработанную авторами и реализованную в условиях производства [1].

Спецификой квазидетерминированных и случайных ДЭИС во многих предметных областях является конечность интервала измерения и сложность, т.е. наличие в их структуре скрытых периодических, почти периодических и ангармонических сигналов<sup>7</sup>, измеряемые параметры которых, как правило, и являются основными носителями информации о состоянии исследуемых объектов, свойствах анализируемых явлений и процессов.

Отметим, что данный класс ЦЭИС относится к классу сигналов *со смешанной структурой*, измерение параметров которых носит статистический характер и в общей теории измерений [2] практически не рассматривается. Для описания и измерения параметров этого класса ДЭИС, требуется:

- использование не только временной формы, но и частотной и/или частотно-временной форм представления (включая применение частотных и частотно-временных математических моделей);
- разработка теоретических основ процессорных измерений параметров сигналов различной структуры и информационной природы во временной, частотной и частотно-временной областях;
- разработка соответствующих методов, алгоритмов и ПриИС, обеспечивающих точность, диапазонность и воспроизводимость измерений во временной, частотной и частотно-временной областях.

Исходя из этих положений, а также из определения понятия области измерений<sup>8</sup>, по мнению авторов настоящей работы, **процессорные измерения** на конечных интервалах параметров ЦЭИС,

в силу присущих им специфических свойств и закономерностей, выделяющих их из общей области измерений, следует рассматривать в рамках *отдельной области измерений* [4,5].

Данную область измерений параметров сложных ЦЭИС на конечных интервалах предлагается обозначить термином **«область процессорных измерений»**, выделив, их, таким образом, из общей области прямых и косвенных измерений.

Отметим, что вводимое в данной работе **понятие процессных измерений** не следует смешивать с **понятием цифровых измерений**, которые широко применяются в практике общей теории измерений [2].

1. Пономарева, О.В. Иерархическая морфологическо-информационная модель системы функционального диагностирования объектов на основе цифровой обработки сигналов / О.В. Пономарева, В.А. Пономарев, А.В. Пономарев // Датчики и системы. – 2014. – № 1(176). – С. 2–8.
2. Пономарева, О.В. Основы теории дискретных косвенных измерений параметров сигналов / О.В. Пономарева – Ижевск: Издательство ИжГТУ, 2016. – 172 с.
3. Оппенгейм Э, Применение цифровой обработки сигналов: перев. с англ. / Э. Оппенгейм. – М.: Мир, 1980. – 552 с.
4. Пономарева, Н.В. Повышение точности и расширение функциональных возможностей цифровых фильтров на основе частотной выборки / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 114–119.
5. Пономарева, О.В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 31–38.

УДК 535-3, 535.314

## ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБРАТНОРАССЕЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н., Кречетень О.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Минск, Республика Беларусь

Рентгеновские лучи широко используются в неразрушающем контроле для просвечивания объектов. При этом, как правило, источник и приемник излучения располагаются по разные стороны от объекта, что не всегда возможно реализовать. Альтернативным методом является получение изображения в обратнорассеянных рентгеновских лучах,

при котором объект сканируется рентгеновским пучком, а отраженное излучение регистрируется детектором, расположенным со стороны источника излучения. Несмотря на то, что обратнорассеянное рентгеновское излучение уже давно используется в технике, например, при измерении толщин объектов [1], его использование для получения изображения

<sup>7</sup> **Ангармонический сигнал** – периодический сигнал, представляющий собой сумму основного гармонического сигнала (гармонического сигнала наименьшей частоты) и некоторых его гармоник (гармонических сигналов более высоких частот, частоты которых кратны частоте основного гармонического сигнала).

<sup>8</sup> **Область измерений** – совокупность измерений физических величин, свойственных какой-либо области науки или техники и выделяющихся своей спецификой (РМГ 29 – 99).

объектов в литературе описано в значительно меньшей степени и в основном в виде патентов.

Ранее нами реализован рентгеновский сканер с использованием обратнорассеянного рентгеновского излучения [2] и показана возможность измерения интенсивности обратнорассеянного излучения при построчном сканировании образцов коллиматорным рентгеновским пучком от переносного малоомощного рентгеновского аппарата РЕЙС-25 с напряжением на трубке 25 кВ и током 100 мкА [2].

В данном сообщении приведены изображения объектов, полученные с использованием сканера, в котором в качестве источника излучения используется более мощный рентгеновский аппарат, работающий при более высоком напряжении – 45 кВ, что важно для метода обратного рассеяния рентгеновских лучей.

Разработанный сканер содержит рентгеновскую трубку, механическое сканирующее устройство для формирования узконаправленного рентгеновского пучка и детектор обратнорассеянного рентгеновского излучения.

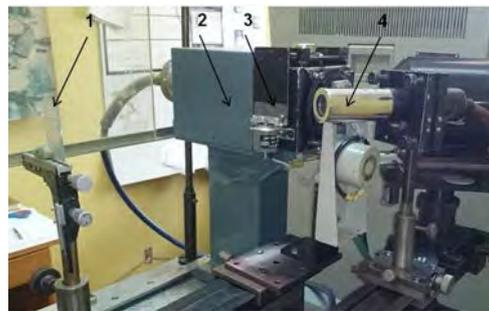
Процесс получения изображения заключается в том, что, перемещая узконаправленный рентгеновский луч, можно произвести поэлементное построение изображения объекта в обратнорассеянном рентгеновском излучении. Обратнорассеянное рентгеновское излучение, приобретающее при этом амплитудную модуляцию вследствие взаимодействия с объектом, можно собрать и преобразовать в электрические сигналы, пригодные для передачи, обработки и записи.

Разработанное сканирующее устройство содержит коллиматор рентгеновских лучей, который перемещается по двум координатам, и таким образом формирует рентгеновский пучок в заданном месте на объекте. Точность позиционирования рентгеновского пучка на исследуемом объекте при его удалении от источника излучения на расстояние 500 мм составила порядка 1-2 мм. Частота перемещения рентгеновского пучка по исследуемому объекту устанавливается программно в диапазоне от 50 до 1000 точек в секунду. При перемещении пучка время счета импульсов от детектора обратнорассеянного рентгеновского излучения устанавливается в диапазоне от 50 до 50000 микросекунд.

В качестве источника излучения используется рентгеновская трубка БСВ17 рентгеновского аппарата ДРОН-2. Напряжение на трубке может устанавливаться в диапазоне от 10 до 45 кВ, ток трубки регулируется в диапазоне от 1 до 14 мА. Интенсивность обратнорассеянного рентгеновского излучения измеряется счетно-вычислительным устройством, состоящим из сцинтилляционного детектора на основе монокристалла NaI(Tl), фотоэлектронного умножителя и усилителя с формирователем счетных импульсов.

Управление сканером, подсчет отраженных импульсов производится посредством микроконтроллера AtMega2560. Передача данных и

команд управления осуществляется по USB-2 интерфейсу. Изображение объекта формируется по заданному алгоритму и выводится на экран монитора компьютера. Программное обеспечение разработано на базе Си/C++.



1 – объект, 2 – источник рентгеновского излучения, 3 – сканирующее устройство, 4- сцинтилляционный детектор

Рисунок 1 – Фотография макета стенда

Для проведения исследований с обратнорассеянным рентгеновским излучением собран макет стенда, фотография которого показана на рисунке 1, структурная схема показана на рисунке 2.

С использованием макета получены изображения металлической пластины и набора графитовых стержней (рисунок 3), то есть объектов из материалов, различающихся порядковым номером. Такой выбор обусловлен тем, что интенсивность обратнорассеянного излучения зависит от порядкового номера материала объекта: рентгеновские лучи сильнее рассеиваются на объектах с малым порядковым номером.

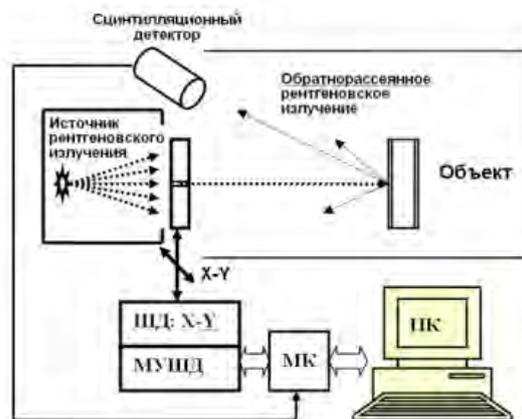


Рисунок 2 – Структурная схема стенда

Сканирование исследуемых объектов рентгеновским лучем проводилось в режиме on-line. Напряжение на рентгеновской трубке выбрано равным 45 кВ, ток - 1 мА. Диаметр отверстия коллиматора - 1 мм. Образцы размещались на расстоянии 200 мм от источника рентгеновского излучения. Поле сканирования составляло 100x130 точек. Изображение объекта формировалось по заданному алгоритму и выводилось на экран монитора компьютера. Время получения изображения образца составляло порядка 20 секунд.

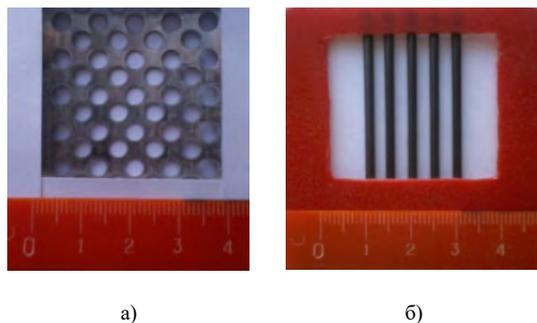


Рисунок 3 – Фотографии металлической пластины (а) и решетки из графитовых стержней (б)

На рисунках 4 и 5 показаны соответственно изображения стальной пластины с отверстиями и решетки из графитовых стержней при их сканировании рентгеновским пучком.

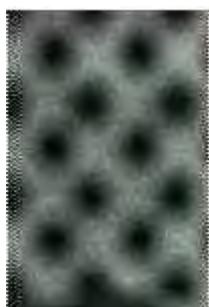


Рисунок 4 – Изображение металлической пластины с отверстиями в обратнорассеянном рентгеновском излучении



Рисунок 5 – Изображение графитовых стержней в обратнорассеянном рентгеновском излучении

Проведенные исследования показали перспективность использования сканирующих систем для получения изображения объектов в обратно рассеянных рентгеновских лучах. Увеличение напряжения на рентгеновской трубке позволяет просвечивать объекты большей толщины, что важно для досмотровых систем.

**Благодарности.** Работа частично поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, проект Ф16Р-070.

1. В.А. Забродский. Применение обратно-рассеянного рентгеновского излучения в промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
2. Сканер для получения изображения объектов в обратнорассеянных рентгеновских лучах [Текст]/ Ю.И. Дудчик, Г.И. Хилько, П.В. Кучинский, А.Н. Новик, М.И. Новик, И.В. Белый, Крעותень О.В. // Материалы девятой Международной научно-технической конференции Приборостроение-2016 – Минск, БНТУ, 2017. – С. 50–51.

УДК 620.18:621.7-4

### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ АППАРАТУРЫ

Бобрикович А.А., Гусев О.К., Воробей Р.И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Представленный метод контроля качества основан на способности эксперта разделять на компоненты всю совокупность ощущений, возникающих при прослушивании звуковоспроизводящей аппаратуры, и оценивать качество звучания по каждому из них отдельно, а также вклад каждого из этих компонентов в обобщенную оценку качества. Это вызывает необходимость точного определения исследователем каждого признака качества в процессе проведения экспертизы и возможность его отчетливого выделения при прослушивании.

В ходе проведения контроля качества эксперту в случайной последовательности предоставляют для оценки монофонический аудиосигнал и двухканальный стереофонический аудиосигнал. Согласно процессу экспертизы каждый эксперт должен выявить различия сигналов [1]. Для интерпретации своих ощущений эксперты используют 7 групп признаков оценки качества звучания: ширина звуковой картины;

объёмность звучания; прозрачность, четкость, раздельность звучания различных инструментов и голосов; передача низкочастотного диапазона; заметность различных шумов и помех. В таблице 1 приведены некоторые из признаков качества стереофонического звучания.

Таблица 1. Признаки качества стереофонического звучания

Признак качества	Номер группы, $i$	Частотность употребления	
		$A_i$	$B_i$
Ширина звуковой картины	1	0.25	0.32
Заметность шумов и помех	2	0.2	0.03
Передача низкочастотного диапазона	3	0.48	0.39

Кроме самих групп признаков качества, важное значение имеют частотности их употребления. В таблице 1 величины  $A_i$  и  $B_i$  оценивают

значимость (вес) каждого из этих признаков в модели обобщенной оценки качества звучания.

На следующем этапе осуществляется процедура установления соответствия каждого основного компонента определенному признаку качества. Результаты интерпретации представлены в таблице 2. Также указаны весовые множители  $W$  для каждого признака качества, показывающие их значимость при обобщенной оценке звучания квалифицированными экспертами и обычными слушателями.

Таблица 2. Компоненты (основные признаки качества) стереофонического звучания

Компонента стереофонического эффекта	Значимость $W$	
	Эксперты	Слушатели
Пространственное впечатление, объёмность звучания	0.25	0.32
Прозрачность звучания	0.2	0.03
Естественность тембров	0.48	0.39
Чистота звучания	0.9	0.07
Разборчивость звучания	0.56	0.44

Важным фактором при стереовоспроизведении звуковых сигналов является возможность воздействия на слушателя направленностью прихода звуков, что позволяет выявить конфликтность различных звуковых образов, их объединение или противопоставление.

Проведенные исследования показали, что качество стереовоспроизведения настолько велико, что оно является предпочтительным для экспертов и большинства слушателей, и с большой точностью (более чем в 80% случаев) распознается ими.

Сtereoфоническое звучание предпочитается монофоническому даже при худших объективных параметрах качества каналов стереопары. Установлено, что свыше 85% слушателей предпочитают стереофоническое звучание с полосой

частот 50...10000 Гц монофоническому звучанию с полосой частот 20...18000 Гц. Предпочтительность выбора стереовоспроизведения сохраняется даже при сокращении полосы частот монофонического источника звука до 100...7000 Гц. Stereoфоническое звучание при коэффициенте гармоник до 20% предпочитается неискаженному монофоническому звучанию, несмотря на то, что такие искажения уверенно заметны на слух. Порог заметности помех при стереовоспроизведении составляет около -60 дБ, однако при соотношении сигнал-шум 35...40 дБ stereoфонический режим работы источника звука предпочитается монофоническому, несмотря на заметность искажений на слух.

При использовании данного метода контроля качества звуковоспроизводящей аппаратуры на получаемую при измерениях оценку влияет не только вид и величина искажений, но и целый ряд субъективных факторов, например степень подготовленности эксперта, его музыкальные пристрастия, образование, психологическое состояние в момент проведения экспертизы. Для того чтобы исключить или уменьшить влияние перечисленных факторов, проводят серию прослушиваний для большого количества экспертов (более 10) с последующим усреднением результатов. Также на результаты проведения экспертизы влияют внешние условия прослушивания, поэтому регламентируются технические характеристики помещения и оборудования, используемых для проведения испытаний [2].

1. Попов О.Б. «Цифровая обработка сигналов в трактах звукового вещания» / О.Б. Попов, С.Г. Рихтер. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – С. 261–267.
2. Бобрикович А.А., Гусев О.К. Соотношение результатов объективного и субъективного контроля качества аудиосигналов / Приборостроение: материалы 8-й Международной научно-технической конференции: в 2 т. / БНТУ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Т1. – С.54–55.

УДК 620.179.16-534.1

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛН РЭЛЕЯ И СТОУНЛИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Баев А.Р.<sup>1</sup>, Пантелеенко Ф.И.<sup>2</sup>, Захаренко В.В.<sup>2</sup>, Асадчая М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Одно из направлений повышения надежности и работоспособности объектов различного функционального назначения, находящихся в условиях воздействия сложного комплекса факторов (повышенные контактные напряжения, температура и т. д), состоит в модификации поверхности металлоизделий путем цементирования поверхности, ТВЧ закалки, наклепа, наплавки и других

технологий. Одним из базовых методов неразрушающего контроля указанных выше объектов является ультразвуковой, позволяющий выявлять поверхностные дефекты, определять качество поверхностного упрочнения, а также соединения материалов в процессе сварки, пайки, их склеивания по данным скорости поверхностной ультразвуковой (УЗ) волны, ее амплитудным,

амплитудно-частотным и др. характеристикам [1]. При этом большое значение придается повышению чувствительности и надежности ультразвуковых измерений при контроле объектов, имеющих малые габариты, сложный рельеф поверхности и зоны с наиболее опасными дефектами в труднодоступных местах. В частности, для этих целей необходимо создание надежного опорного УЗ сигнала. Для этих целей нами впервые было предложено использовать отражатели поверхностных волн (ОПВ), конструкции которых поясняются рисунками 1, 5. Они представляют собой компактную акустическую нагрузку, выполненную из металла оптимальной формы и контактирующую с объектом контроля через «скользящую» границу. Прохождение поверхностных волн (ПАВ) через такую границу сопровождается трансформацией волны Рэлея в слабозатухающую волну Стоунли, имеющей высокий коэффициент отражения от оппозитной грани ОПВ. Как известно [1], волна Стоунли распространяется на границе контакта двух материалов при условии  $\frac{C_2}{C_1} \geq 1, \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 1$  или  $\frac{C_2}{C_1} \leq 1, \frac{\rho_1}{\rho_2} \geq 1$ , где  $C_i$  и  $\rho_i$  – скорости УЗ волны и плотности материала ОПВ ( $i=1$ ) и объекта ( $i=2$ ) соответственно. Волновые уравнения, описывающие распространения волны Стоунли через скалярный  $\varphi_i$  и векторный  $\psi_i$  потенциалы имеют вид

$$\Delta\varphi_i + (k_{li})^2\varphi_i = 0, \Delta\psi_i + (k_{ti})^2\psi_{ti} = 0,$$

где  $k_{li}, k_{ti}$  – волновые числа продольной и поперечной волны соответственно.

В работе впервые экспериментально изучены закономерности трансформации и распространения ПАВ через «скользящую» границу контакта стальной подложки с ОПВ имеющей форму призмы, в зависимости от (рис.1): а) угла наклона его боковой грани ( $-60^\circ \geq \alpha \geq 60^\circ$ ) и ее направления к источнику ПАВ ( $O_x \uparrow \downarrow k_{ПАВ} \parallel O_x$ ); б) материала ОПВ (сталь, латунь, дюралюминий); в) угла поворота  $\theta$  призмы ОПВ в горизонтальной плоскости.

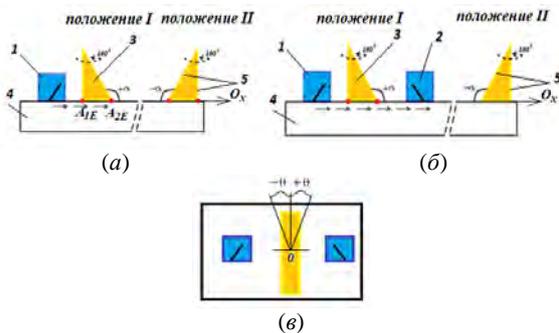


Рисунок 1 – Экспериментальная схема исследования прохождения и трансформации ПАВ при наличии ОПВ в режиме эхо (а) и теновом (б, в) режимах: 1, 2 – ПЭП; 3 – ОПВ; 4 – подложка объекта; 5 – боковые грани;  $\alpha$  – угол наклона боковых граней;  $\theta$  – угла поворота призмы ОПВ в горизонтальной плоскости

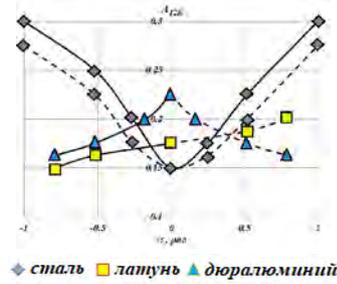


Рисунок 2 – Влияние угла наклона боковой грани призмы ОПВ на отношение амплитуд  $A_{12,E}$  при двух положениях призмы - как на рисунке 1: положение I (--) и II (—)

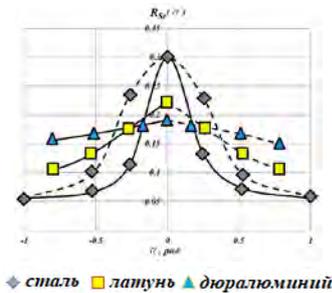


Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов отражения волны Стоунли  $R_{St}(\alpha)$  от угла наклона боковой грани призмы ОПВ: положение I (--) и II (—)

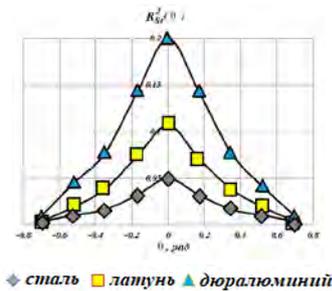


Рисунок 4 – Влияние угла  $\theta$  поворота призмы ОПВ в горизонтальной плоскости на величину  $(R_{St})^2$

Ниже в таблице приведены данные по соотношению продольных  $l_i$  и поперечных  $t_i$  скоростей и плотностей  $\rho_i$  контактирующих материалов ОПВ и подложки.

Свойства материалов ОПВ и стальной подложки

Материал ОПВ	$\rho_1/\rho_2$	$C_{12}/C_{11}$	$C_{12}^2/C_{11}$
Сталь	1	1	1
Латунь	1,03	1,34	1,53
Дюралюминий	0,34	0,94	1,04

В работе проводится качественный анализ акустического тракта и впервые экспериментально исследуется ряд параметров акустического тракта ультразвуковой измерительной системы с ОПВ. Во-первых, определяется (в режиме эхо) отношение  $A_{12,E} = A_{1E} / A_{2E}$  амплитуд отраженных ПАВ от передней ( $A_{1E}$ ) и задней ( $A_{2E}$ ) граней ОПВ в зависимости от угла наклона  $\alpha$  одной из них (рис. 2). Эта величина характеризует важный для практики параметр – соотношение

сигнал-шум при использовании ОПВ в качестве опорного сигнала при измерении скорости и амплитудных параметров зондирующей объект ПАВ. Во-вторых, впервые выявлены зависимости (в теневом режиме) коэффициенты отражения волны Стоунли  $R_{St}$  от угла наклона призмы ОПВ  $\alpha$  (рис. 3) и ее угла поворота  $\theta$ . Для этого вначале определяем величину  $R_{St0}$ , из соотношения  $R_{St0}=(A_0/A_1)^{0.5}$ , измеренного при использовании в качестве ОПВ прямоугольной призмы ( $\alpha=0$ ), а затем находим искомое значение из формулы

$$R_{St}(\alpha)=A_0(A_1R_{St0})^{-1}, \quad (1)$$

где  $A_0$  – амплитуда прошедшая через границу контакта ОПВ с подложкой ПАВ без переотражения,  $A_1$  – с переотражением волны Стоунли от задней и передней грани ОПВ. Зависимость же  $R_{St}^2(\theta)$  (рис. 4) получена в случае, когда ОПВ имеет вид прямоугольной призмы ( $\alpha=0$ ), причем ее величину находим из формулы, подобной (1).

Как следует из результатов исследования предложенные конструкции ОПВ, выполненные для разных материалов (сталь, латунь дюралюминий) обеспечивающих трансформацию и распространение волн Стоунли на границе стальная подложка-ОПВ являются высоко эффективными отражателями ПАВ. Причем максимальная их эффективность, характеризуемая соотношением сигнал-шум при использовании ОПВ в качестве опорного сигнала для измерения скорости и амплитудных параметров зондирующей объект ПАВ достигается при оптимальном угле наклона боковой грани ОПВ  $\alpha$ , его угла поворота  $\theta(0, \pi)$  и зависит от материала отражателя.

Также впервые определены коэффициенты отражения волны Стоунли  $R_{St}$  в зависимости от указанных выше параметров ОПВ – углов  $\alpha$  и  $\theta$ , и материала. Причем эти зависимости имеют сложный вид, изменяясь по величине на порядок.

УДК 681.2.08

## АНАЛИЗ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭДС НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ПЭВД

Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Кравцевич А.В.<sup>2</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Гродненский филиал «Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения» ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь

В работе представлены результаты исследований и разработаны принципы контроля однородности свойств нанокompозитных полимеров на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД) по пространственному распределению электростатического потенциала и поверхностной фотоЭДС. В качестве средств измерения использован модифицированный сканирующий зонд Кельвина, дополнительно оснащенный источником оптического излучения.

Учитывая полученные данные, проведен расчет и предложена оптимальная конструкция ОПВ, существенно нивелирующая (~35 дБ и более) влияние шумового фона, на ультразвуковые измерения свойств поверхности. На рисунке 5 приведена одна из предложенных конструкций ультразвукового устройства с ОПВ, где граница контакта передней грани призмы с подложкой выполнена в виде двух ветвей параболы.

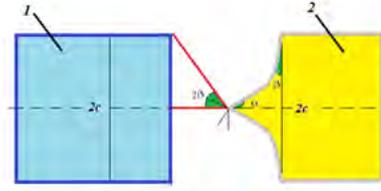


Рисунок 5 – Конструкция ультразвукового устройства с ОПВ, граница контакта передней грани призмы которого с подложкой выполнена в виде двух ветвей параболы:  
1 – излучающий ПЭП; 2 – ОПВ

Использование таких устройств с ОПВ позволяет: а) практически в два раза сократить акустическую базу при измерениях скорости ПАВ, а также концентрировать акустические пучки путем выполнения границы контакта задней грани призмы с подложкой в виде фокусатора; б) обеспечить высокостабильный опорный сигнал как на плоских, так и криволинейных поверхностях (радиусом до 15 мм). Полученные результаты исследований также представляют интерес для контроля качества сцепления разнородных материалов, пар трения и др.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ, проект T17-159.

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.

**Введение.** Сканирующие зонды Кельвина традиционно применяют для анализа и контроля однородности свойств прецизионных поверхностей металлов, полупроводниковых материалов и объектов по параметрам пространственного распределения работы выхода электрона, определяемой по контактной разности потенциалов (КРП) относительно зондового образца [1].

Анализ литературных данных, например, [2] и проведенные ранее исследования [3] показывают,

что методы КРП применимы и к полимерным материалам. В этом случае контролируемым параметром является собственный или приобретенный электростатический потенциал (заряд) полимера. Однако в случае диэлектриков методы КРП перестают быть поверхностно-чувствительными, поскольку в формировании измерительного сигнала участвует также и объем материала в области под зондом. Поэтому для характеристики каких-либо физических параметров информация о пространственном распределении электростатических потенциалов оказывается недостаточной. Более полную информацию о электронных явлениях дает дополнительное возбуждение измеряемой поверхности светом, что позволяет генерировать электроны с определенными энергетическими состояниями. Основными задачами данной работы являлись адаптация сканирующего зонда Кельвина, разработка методики и проведение экспериментальных исследований отклика КРП на зондирующее воздействие оптическим излучением поверхности полимерных композитов.

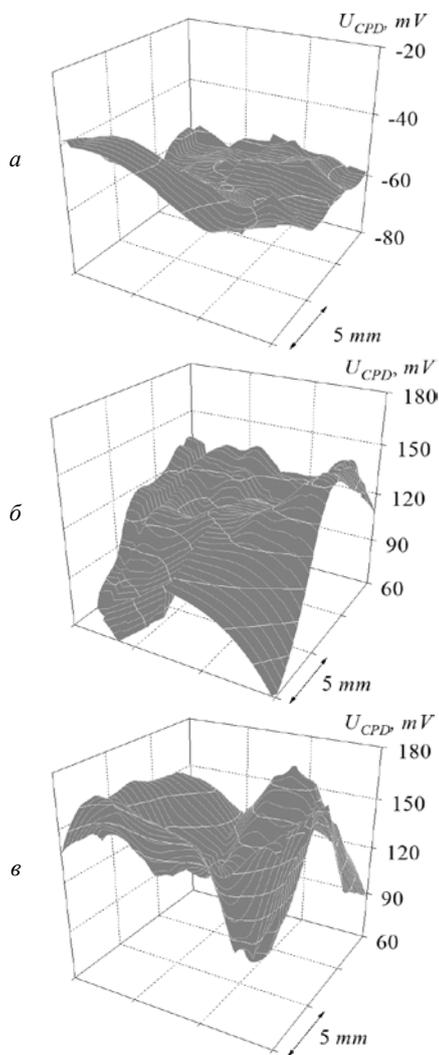


Рисунок 1 – Визуализация распределения электростатического потенциала образцов 1–3: а, б, в, соответственно

**Материалы.** Исследования проводили на образцах полимерных нанокompозитов на основе ПЭВД марки 12203-250. В качестве наполнителей использованы углеродный наноматериал (УНМ) и наночастицы алюминия (Al). Перед испытанием нанокompозитные образцы кондиционировали в изопропиловом спирте в течение 24 часов и нормализовали в лабораторных условиях в течение 8 часов. Характеристика образцов и их условные обозначения (УО) приведены в таблице.

Характеристика образцов

УО	Компонентный состав
1	ПЭВД (97 мас.%) / УНМ (2 мас.%) / Al (1 мас.%)
2	ПЭВД (94 мас.%) / УНМ (4 мас.%) / Al (2 мас.%)
3	ПЭВД (91 мас.%) / УНМ (6 мас.%) / Al (3 мас.%)

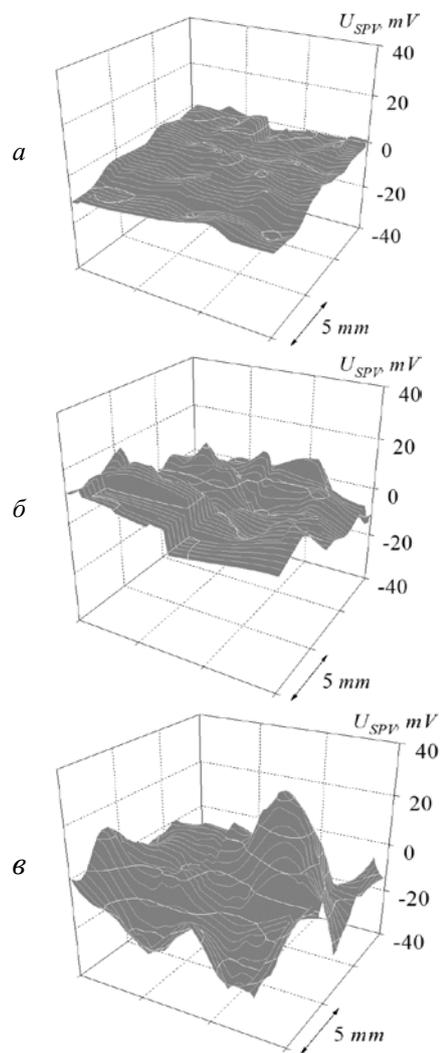


Рисунок 2 – Визуализация распределения поверхностной фотоЭДС образцов 1–3: а, б, в, соответственно

**Результаты исследования.** Результаты визуализации пространственного распределения электростатического потенциала (КРП) образцов 1–3 приведены на рисунке 1 а–в, соответственно. Минимальное среднее значение электростатического потенциала –65 мВ имеет образец а<sub>1</sub> (рису-

нок 1а). Распределение потенциала практически однородно по всей измеряемой площади с разбросом значений в диапазоне  $\pm 5$  мВ. При этом потенциальный рельеф имеет несколько локальных экстремумов, характеризующих совокупность дефектов в объеме и поверхности образца. При этом наибольший максимум  $-42$  мВ наблюдается у края образца.

Увеличение соотношения массы наполнителя к полимерной матрице приводит к изменению полярности и увеличению среднего значения электростатического потенциала (рисунок 1б, в). Распределение потенциалов менее однородно. Величина экстремумов также возрастает, что характерно для случая скопления дефектов.

На рисунке 2а–в приведены результаты картирования распределения поверхностной фотоЭДС образцов 1–3, соответственно. Поверхностную фотоЭДС определяли, как разность значений КРП до и после оптического зондирования.

Из визуализированных карт видно, что для всей группы образцов характер распределения поверхностной фотоЭДС близок к распределению электростатического потенциала. Так, наиболее однородное распределение имеет образец 1 (рисунок 2а), при этом наблюдается уменьшение фотоЭДС к краю образца, когда значение электропотенциала (рисунок 1а) возрастает. Для образца 2 (рисунок 2б) характерна обратная зависимость: в одной из областей, где значение электропотенциала было минимальным (рисунок 1б), фотоЭДС ступенчато возрастает.

Другим наблюдаемым эффектом является то, что некоторые области с локальными экстремумами электропотенциала и фотоЭДС (рисунки 1 и 2) дублируются, например, значения фотоЭДС  $34$  мВ (рисунок 2в) и электропотенциала  $178$  мВ

(рисунок 1в) образца 3. Однако, в случае второго пика, площадь распределения поверхностной фото-ЭДС с максимумом  $12$  мВ значительно меньше площади распределения электропотенциала с максимумом  $160$  мВ.

**Выводы.** Анализ результатов исследования показал, что относительные значения и однородность распределения электростатического потенциала и поверхностной фотоЭДС зависят от компонентного состава и концентрации наполнителя измеряемых образцов. Увеличение значений поверхностной фотоЭДС в отдельных областях свидетельствует о большой плотности заполнения поверхностных состояний, связанными, по всей видимости, с дефектами, объема поверхностного слоя, участвующего в оптическом зондировании. Поэтому использование дополнительного оптического воздействия позволяет не только определять и визуализировать распределение поверхностной фото-ЭДС, но и разделять неоднородности свойств объема материала и его поверхности.

1. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов / А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, А. К. Тявловский // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т.; Витебский гос. тех. ун-т; ред. В. В. Клубович. – Витебск, 2015. – Т. 1. – С. 381–394.
2. Ebrahimi, G. Investigation on corrosion protection mechanism of polyaniline nanoparticles doped with phosphoric acid by scanning Kelvin probe and other electrochemical methods / G. Ebrahimi, F. Rezaei, J. Neshati // J. of the Taiwan Inst. of Ch. Eng. – 2016. – No 10. – P. 1–10.
3. Вершина, Г.А. Исследование накопления заряда статического электричества на поверхности изделий из фторопласта-4 методом вибрирующего конденсатора / Г. А. Вершина, А. Л. Жарин, А. К. Тявловский // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 26–32.

УДК 620.179.14/15

## МЕТОДИКА И ОСОБЕННОСТИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бусько В.Н.<sup>1</sup>, Фисюнов А.Д.<sup>2</sup>, Рубникович С.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ГУО «Витебский государственный медицинский университет», Витебск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ГУО «Белорусская медицинская академия последипломного образования», Минск, Республика Беларусь

В технике, авиационно-космической отрасли (АКО), строительстве, медицине и других отраслях все чаще используют композиционные материалы (КМ), обладающие рядом уникальных свойств [1]. Так, в машиностроении КМ используют для изготовления деталей, работающих при повышенных нагрузках и температурах: лопатки компрессоров, лопасти турбин и вентиляторов, поршневые пальцы, вкладыши, втулки, антифрикционные детали и др. В АКО – пластмассовые КМ используются для производства таких несущих конструкций, как крылья, фюзеляжи и поперечные балки, на основе металлов - лопатки

турбин, штоки поршней, трубы теплообменников и др. В строительстве – для изготовления противопожарных панелей на основе алюминия, для усиления несущих конструкций и жесткости зданий арматуры из стеклопластиков и углепластиков (в разы показатели выше, чем у стали) и т.д. В медицине – для изготовления армирующих пластинок для соединения костей при переломах, изготовления сердечных клапанов, имплантации зубов, изготовлении протезов и т.д.

Такие характеристики КМ как удельная прочность, сопротивление усталостному разрушению, температуре и воздействию среды, жесткость,

износостойкость, наличие низкой плотности и др. обуславливают их широкое внедрение и необходимость всестороннего изучения. Учитывая вышесказанное, исследование физико-механических характеристик КМ можно отнести к приоритетным задачам. Например, в связи с набором уникальных свойств в настоящее время полиармированные КМ, состоящие из светоотверждаемого композиционного материала и упрочнителей (стекловолокно и т.д.) интенсивно применяются в стоматологии. Применение композитно-армированных культевых штифтовых вкладок является эффективной альтернативой стандартным металлическим штифтам и литым штифтовым вкладкам при восстановлении дефектов твердых тканей зубов [2].

Цель работы – доработка и адаптация экспериментальной установки для исследования и контроля усталостной долговечности КМ с неметаллической матрицей, используемых в стоматологии, установление влияния степени армируемости на прочность составной конструкции из КМ.

Механические испытания полимерных КМ вследствие ряда особенностей (высокая хрупкость, малые напряжения и др.), в отличие от испытаний образцов металлических материалов, имеют свои методические и прикладные сложности и особенности.

Усталостные испытания композиционных материалов проводили на малогабаритной лабораторной установке [3], разработанной и изготовленной в ИПФ НАН Беларуси и предназначенной для механических испытаний плоских образцов из ферромагнитных материалов. Принцип работы установки основан на циклическом нагружении свободного конца консольно защемленного образца специальным силовым элементом в виде подшипника качения.

Для фиксации и крепления испытуемого составного образца из КМ предложено использовать специальные фиксаторы, изготовленные из стали в виде параллелепипеда длиной 40 и шириной 12 мм с просверленными по центру торцевой поверхности отверстиями глубиной 5 мм и диаметром, соответствующим диаметру образца.

Конструкция фиксатора, схема крепления и фиксации образца в узле защемления установки показаны на рис. 1.

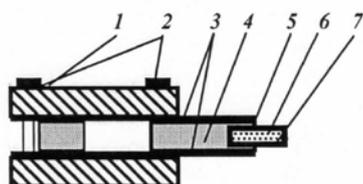


Рисунок 1 – Схема фиксации и крепления образца из КМ в узле защемления установки для исследования усталостной долговечности: 1- узел защемления; 2-болты; 3-прижимные пластины; 4-фиксатор; 5-цемент; 6-основная матрица; 7-армирующий элемент

Для соблюдения условий по прочности соединения, демпфирования и снижения влияния ударных воздействий силовозбудителя на испытуемый объект все исследуемые образцы в фиксаторах крепились композиционным цементом двойного отверждения RelayX U200 (3M ESPE). Количество изготовленных стальных фиксаторов соответствовало количеству исследуемых в эксперименте образцов.

На рис. 2 приведена фотография внешнего вида стальных фиксаторов с закрепленными в них образцами для исследований сложного КМ.



Рисунок 2 – Внешний вид фиксаторов-держателей с закрепленными образцами из КМ

Для оценки степени применимости установки, а также для исследования усталостной долговечности сложных КМ было изготовлено 8 образцов в виде цилиндров с различными механическими свойствами, определяемыми разным количеством (от 0 до 6) и диаметром (1 и 1,5 мм) армирующих стекловолоконных штифтов для повышения прочности. Композитные цилиндры имели диаметр 4,6 и высоту 17 мм. В качестве основного материала использовали светоотверждаемый композиционный материал Gradia direct posterior P-A3 (GC). Армирующие волоконные штифты были представлены стекловолоконными штифтами D.T. Light Post (Эстейд Сервис Групп).

В результате нагружения свободного конца образца с постоянной амплитудой напряжений  $\sigma$  в зоне образования максимальных изгибных напряжений с увеличением количества циклов нагружения  $N$  происходит накопление усталостной повреждаемости, образуются вначале невидимые, затем видимые усталостные трещины, вследствие чего снижается механическая прочность цельной конструкции из КМ и происходит разрушение. В данном случае параметр  $N$  являлся количественной мерой усталостной долговечности конструкции из КМ. Предварительные испытания материалов из КМ показали работоспособность и эффективность предложенного подхода при экспериментальном исследовании различных типов штифтовых конструкций на усталость [4].

Таким образом, получены следующие результаты:

– разработана и реализована методика усталостных испытаний композитно-армированных культевых штифтовых вкладок с разным количеством армирующих элементов с использованием малогабаритной лабораторной установки для испытания образцов на усталость;

– с использованием специальных фиксаторов для исследования образцов из КМ круглого сечения показана возможность экспериментального исследования и оценки влияния параметров неметаллических композиционных штифтов (диаметра и их количества) на усталость конструкции из КМ;

– показано, что методика и технология испытания образцов сложных КМ с помощью регулирования режимов нагружения (амплитуды, напряжений, формы цикла, направления изгибающего момента) и параметров образцов позволяет моделировать реальное состояние исследуемого объекта для оптимизации конфигурации (габаритов и состава) матрицы и схемы армирования (количества, материала и диаметра штифтов).

1. Арзамасов В.Б., Черепяхин А.А. *Материаловедение: учебник для ВУЗов* – М.: Экзамен, 2009. – 350 с.
2. D’Arcangelo, C. Fracture resistance and deflection of pulpless anterior teeth restored with composite or porcelain veneers / C. D’Arcangelo, F. De Angelis, M. Vadini, M. D’Amaro, S. Caputi // *J Endod.* – 2010. – №36. – P. 153-156.
3. Бусько, В.Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов / В.Н. Бусько // *Приборы и техника эксперимента.* – 2011. – № 1. – С. 165–167.
4. Рубникович, С.П. Методика усталостных испытаний композитно-армируемых культовых штифтовых вкладок с армирующими элементами/С.П. Рубникович, А.Д. Фисюнов, В.Н. Бусько // *Стоматолог*, 2017. – №2. – С. 14–18.

УДК 681

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ПЛАТФОРМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Гладкий А.В., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Ряд мобильных устройств, техники, вооружения при подготовке их к эксплуатации, а также в процессе эксплуатации, требуют горизонтирования платформ, на которых они установлены. Система горизонтирования предназначена для проведения прецизионных операций выставки установок платформы, проведения операций подъема, горизонтирования и опускания самоходных пусковых установок, горизонтирования платформ транспортных установок [1].

Объектом разработки является система автоматизированного горизонтирования платформы радиолокационной станции (РЛС), состоящая из нескольких отдельных блоков, собранных на одной платформе.

Решение задачи горизонтирования складывается из решения следующих подзадач:

- обеспечение требуемой точности выравнивания несущего основания;
- обеспечение требуемой оперативности процесса горизонтирования;
- сохранение максимально устойчивого положения после горизонтирования;
- распределение нагрузки на опоры.

Реализация системы автоматизированного горизонтирования на базе микроконтроллера позволяет выполнять полностью как в автоматическом режиме, так и в ручном вывешивание платформы на выносных электромеханических цилиндрах и ее горизонтирование. При этом предотвращаются ситуации отрыва опор от грунта [2].

Электроцилиндры конструктивно выполнены на базе механической планетарной роликвинтовой передачи, преобразующей вращательное движение в поступательное, которая интегрирована

непосредственно в ротор сервомотора с постоянными магнитами. Сервомотор оснащается датчиков обратной связи – прецизионный абсолютный многооборотный датчик с интерфейсом связи *EnDat Heidenhain*, которые используются для линейного позиционирования. Разрешение датчика составляет от 4096 импульсов до 8 млн. импульсов, что дает линейное разрешение до одного микрона. Обмотки статора электромотора выполнены по специальной технологии T-LAM, ламинированные сегменты которых не имеют лобовых частей, что увеличивает крутящий момент и уменьшает габариты. Обмотки залиты специальным компаундом и впрессованы в корпус электроцилиндра. Это обеспечивает полную герметичность и нечувствительность к окружающей среде.

Алгоритм горизонтирования платформы основан на применении системы координат, привязанной к диагоналям основания (рисунок 1).

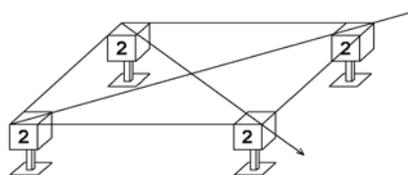


Рисунок 1 – Схема расположения электроцилиндров

Осями координат будут являться прямые, проходящие через расположенные на концах одной диагонали электроцилиндры. Это позволит обеспечить независимое регулирование по двум диагоналям. Таким образом, гарантируется возможность одновременной работы всех четырех электроцилиндров. Электроцилиндры, расположенные на концах одной диагонали объединяются в пары и

работают одновременно. От инклинометра поступает информация о текущем отклонении основания по продольной и поперечной осям, относительно горизонта. На основании этих данных рассчитывается отклонение по осям диагоналей, исходя из чего, определяется направление вращения для каждого электродвигателя. Для каждой пары электроцилиндров, направление вращения двигателя будет противоположным. Таким образом, первый двигатель поднимает, второй опускает. Это ускоряет процесс горизонтирования. После того, как направления вращения заданы, на электродвигатели подается импульс с заранее заданной продолжительностью. После чего происходит повторный опрос инклинометра. Вся процедура повторяется до тех пор, пока показания инклинометра не будут в пределах заданного допуска. На этом процедура горизонтирования считается завершенной.

Пульт дистанционного управления предназначен для беспроводного подключения и управления выносными исполнительными устройствами – электроцилиндрами, отображения текущей информации о положении платформы, предупреждения при аварийных ситуациях.

Пульт дистанционного управления соответствует следующим техническим характеристикам: степень защиты IP 65, климатическое исполнение В1.

Включение и отключение системы производится как блоком управления, так и пультом дистанционного управления. Возможности пульта дистанционного управления расширены по сравнению с блоком управления. Блок управления является дублирующим органом при выходе пульта дистанционного управления из строя.

Разработана оригинальная конструкция пульта дистанционного управления, обеспечивающая герметизацию и амортизацию внутренних компонентов устройства. Питание устройства дистанционного управления может осуществляться как от бортовой сети автомобиля, так и от автономного источника питания – литий-железо-фосфатные аккумуляторы, которые позволяют обеспечить продолжительную работу устройства в жестких климатических условиях: от  $-40$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .



Рисунок 2 – Пульт дистанционного управления системы горизонтирования

Корпус устройства изготавливается из ударопрочного пластика.

Пульт дистанционного управления покрыт специальным лакокрасочным покрытием – *soft-touch*, что позволяет защитить устройство от механических воздействий, улучшить амортизирующие свойства самого материала и удобство эксплуатации.

Произведен расчет надежности элементов электрических компонентов пульта дистанционного управления. При вероятности безотказной работы 0,85 наработка на отказ электронной части пульта дистанционного управления составляет не менее 5000 часов.

В области систем горизонтирования приняты следующие конструкторские и технические решения: использование электропривода, беспроводное соединение между пультом дистанционного управления и блоком управления системы горизонтирования, автоматический и ручной режимы работы.

Таким образом, разработанная система автоматизированного горизонтирования платформы РЛС обладает следующими преимуществами:

- автоматический и ручной режимы горизонтирования;
- точность горизонтирования – плюс-минус три градуса;
- статическая ошибка горизонтирования по сигналам датчика углов наклона в двух взаимно перпендикулярных плоскостях продольной (тангаж) и поперечной (крен) – не более  $\pm 30'$ ;
- беспроводной пульт дистанционного управления;
- полная разгрузка подвески шасси при вывешивании;
- общее время режима упора в грунт и режима автоматического горизонтирования, включая время грубого и точного горизонтирования, при максимальных углах наклона рабочей площадки – не более четырех минут;
- температура эксплуатации – от минус 40 до плюс  $50^{\circ}\text{C}$ .

1. Щербаков, В.С. Автоматизация проектирования устройств управления положением платформы строительной машины : монография / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, М.Г. Григорьев. – Омск : СибАДИ, 2011. – 119 с.
2. Святун, Р. А. Автоматическая система горизонтирования для размещения высокоточного оборудования / Р.А. Святун, В.А. Резников // Системный анализ и управление организационными и техническими объектами: материалы V Всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Донецк, 22–23 апреля 2014 г.) / Донецкий национальный технический университет. – Донецк, 2014. – С. 559–563.

## ТОЛЩИНОМЕТРИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДВУХСЛОЙНОГО НИКЕЛЬ-ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА НЕМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ МАГНИТООТРЫВНЫМ МЕТОДОМ

Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Характеристики и надежность современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) во многом определяются свойствами специальных покрытий, применяемых при их производстве. Одним из основных элементов любого ЖРД является камера сгорания (рис. 1). Для придания ей требуемых эксплуатационных свойств наиболее широкое применение нашло нанесение толсто-слойных никелевого (Ni) и хромового (Cr) покрытий. При этом главным параметром, определяющим способность покрытия после нанесения выполнять свою функцию, является его толщина и равномерность ее распределения.



Рисунок 1 – Структура многослойной стенки камеры сгорания ЖРД

Предложенная в [1] методика определения толщины хромового покрытия может использоваться только на стадии производства изделий ракетной техники, когда есть доступ к изделию до и после нанесения хромового покрытия на под-слой никеля. Однако, когда уже готовое изделие поступает на последующие этапы сборки на другое предприятие, то часто встает вопрос входного контроля толщин покрытий из никеля и хрома. В данном случае применить предложенные методики контроля, описанные в [1], на готовом изделии оказывается либо невозможным, либо приводит к недопустимым погрешностям результатов измерений. Поэтому вопрос об определении толщин компонентов двухслойных никель-хромовых покрытий является достаточно важным и практически значимым.

Новый подход к решению поставленной задачи был разработан на основании использования физических закономерностей постоянных магнитов применительно к рассматриваемым двухслойным покрытиям, установленных в [1].

Предлагаемая методика основывается на использовании двух постоянных магнитов с различными полюсными расстояниями. При этом в обоих случаях постоянные магниты должны

иметь максимально возможное значение намагниченности. Исходя из этих требований в качестве материала для изготовления магнитов был использован NdFeB (неодим-железо-бор).

В результате анализа работы [1], магниты были выбраны таким образом, чтобы один из них имел высокую чувствительность к толщине хромового покрытия, а второй высокую чувствительность к толщине никелевого покрытия. Для этого первый магнит (далее магнит А) должен иметь значительно меньшее полюсное расстояние, чем второй магнит (далее магнит Б). В нашем случае для магнита А полюсное расстояние составляло примерно 0.4 мм, а для магнита Б порядка 2 мм. Регулировка полюсного расстояния осуществлялась за счёт изменения радиуса сферического наконечника постоянного магнита.

Суть методики состоит в получении двух результатов измерений магнитоотрывного усилия  $F_A$  и  $F_B$  двумя магнитами А и Б в одной точке на готовом изделии и вычисления по полученным ранее зависимостям толщин никелевого и хромового покрытий. Отметим, что под магнитоотрывным усилием мы понимаем усилие (силу), которое необходимо приложить к магниту, чтобы оторвать его от ферромагнитной поверхности, равное силе притяжения магнита к этой поверхности.

Для вычисления толщин никелевого и хромового покрытий в первую очередь необходимо предварительно получить три основополагающие экспериментальные зависимости:

- силы притяжения  $F_{A0}$  магнита А к чистому никелевому покрытию от силы притяжения  $F_B$  магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре (рис.2);
- силы притяжения  $F_A$  магнита А от толщины хромового покрытия  $h_{cr}$  (рис. 3);
- результата измерения толщины никелевого покрытия  $h_{Ni}$  от силы притяжения  $F_B$  магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре (рис.4).

Далее, на основании значения измеренного магнитоотрывного усилия  $F_B$  магнита Б и зависимости на рисунке 2 необходимо получить для данной точки изделия диапазон  $\{F_{A0.1}, F_{A0.2}, \dots, F_{A0.i}\}$  возможных значений силы притяжения магнита А к свободному от хрома никелевому покрытию, зависящий от реальной толщины хромового покрытия  $h'_{cr}$ .

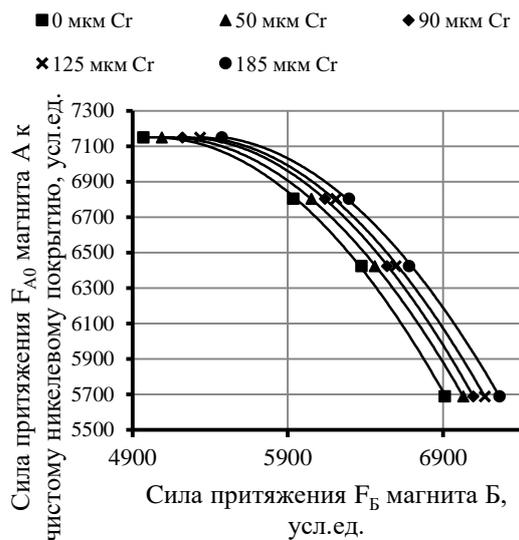


Рисунок 2 – Зависимость силы притяжения магнита А к чистому никелевому покрытию от силы притяжения магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре

Используя полученное множество  $\{F_{A0-1}, F_{A0-2}, \dots, F_{A0-i}\}$ , результат измерения магнитом А отрывного усилия  $F_A$  и зависимость на рисунке 3, получить по методике, изложенной в [1], множество  $\{h_{cr-1}, h_{cr-2}, \dots, h_{cr-i}\}$  возможных толщин хромового покрытия в данной точке изделия.

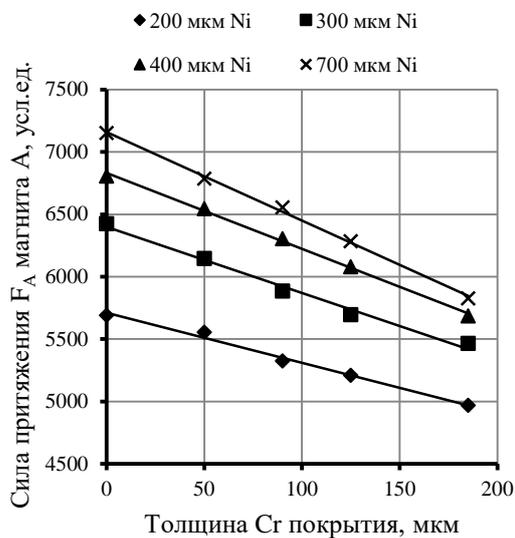


Рисунок 3 – Зависимость силы притяжения  $F_A$  магнита А от толщины хромового покрытия

За истинное значение толщины хромового покрытия  $h_{cr}$  надо принять одно из значений полученного множества  $\{h_{cr-1}, h_{cr-2}, \dots, h_{cr-i}\}$ , которое имеет наименьшее расхождение с одним

из значений  $h'_{cr-i}$  диапазона  $\{h'_{cr-1}, h'_{cr-2}, \dots, h'_{cr-i}\}$  реальных толщин хромового покрытия, которое использовалось для вычисления силы притяжения  $F_{A0-i}$  и, соответственно,  $h_{cr-i}$ :  $|h'_{cr-i} - h_{cr-i}| \rightarrow 0$ .

На основании данных об истинной толщине хромового покрытия  $h_{cr}$  и значении магнитоотрывного усилия  $F_B$  магнита Б, используя зависимость на рисунке 4, можно определить истинную толщину никелевого покрытия  $h_{Ni}$ .

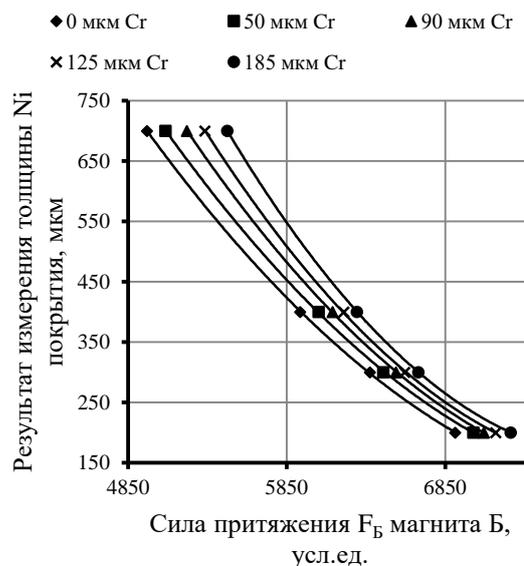


Рисунок 4 – Зависимость результата измерения толщины никелевого покрытия от силы притяжения магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре

Таким образом, предложена методика, позволяющая определить толщины составляющих двухслойного никель-хромового покрытия, нанесенного на немагнитное основание, при одностороннем доступе к контролируемому изделию без априорных данных о свойствах или толщинах этих покрытий или изделия в целом. Представленные результаты исследований были получены с помощью разработанного в ИПФ НАН Беларуси нового пондеромоторного толщиномера двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1 с использованием образцов никелевых фольг четырех номиналов толщин (200 мкм, 300 мкм, 400 мкм и 700 мкм), а также четырех немагнитных пленок толщиной 50 мкм, 90 мкм, 125 мкм и 185 мкм, имитирующих хромовое покрытие.

1. В.А. Рудницкий, Е.В. Гнутенко, А. П. Крень. Определение толщины двухслойных никель-хромовых покрытий магнитным методом. // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 24–29.

## СФЕРИЧЕСКИЕ И ХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ

Дудчик Ю.И.<sup>1</sup>, Серебренников Д.А.<sup>2</sup>, Ершов П.А.<sup>2</sup>,  
Климова Н.Б.<sup>2</sup>, Снигирев А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь  
<sup>2</sup>БФУ имени И. Канта, НОЦ «Функциональные наноматериалы», Калининград, Россия

Как известно, коэффициент преломления рентгеновских лучей в веществе незначительно отличается от единицы, поэтому в течении почти ста лет после открытия рентгеновских лучей преломляющая оптика в этом диапазоне считалась неэффективной. И только в 1996 группа российских и немецких исследователей опубликовали работу [1], где была сформулирована идея многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы и показана ее практическая реализация. Эта работа послужила основой для развития нового направления в рентгеновской оптике – преломляющей рентгеновской оптики. Многоэлементная преломляющая рентгеновская линза состоит из большого числа  $N$  (от 50 до 350) двояковогнутых микролинз, выполюченных из материала с малым порядковым номером. Использование большого числа микролинз позволяет уменьшить фокусное расстояние в  $N$  раз по сравнению со случаем одной линзы. Микролинзы изготавливаются из материала с небольшим порядковым номером, что связано с тем, что в этом случае показатель преломления для рентгеновских лучей значительно превышает показатель ослабления.

В настоящее время существует целый ряд способов изготовления линз: сверлением, прессованием, с использованием метода литографии. В НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ было предложено формировать двояковогнутые микролинзы внутри стеклянного капилляра. Идея оказалась перспективной – удалось разработать и изготовить линзы, фокусирующие рентгеновские лучи с энергией фотонов от 8 кэВ до 20 кэВ в пятна размером около одного микрометра. Фокусировка излучения осуществлялась на синхротронных источниках излучения, где используется монохроматический рентгеновский пучок. Линзы являются короткофокусными (5-10 см для фотонов с энергией 8 кэВ) и поэтому могут быть использованы для фокусировки излучения от лабораторных микрофокусных аппаратов. Поскольку излучение в этом случае не является монохроматическим, то необходимо указать требования к монохроматичности пучка, при котором возможно получение рентгеновских микропучков.

Ранее в [2] нами была показана возможность получения рентгеновских микропучков от лабораторного микрофокусного рентгеновского аппарата с использованием многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы.

Принципы работы преломляющей рентгеновской линзы схожи с оптикой видимого света –

рентгеновская линза позволяет получать изображения, как источников излучения, так и объектов на пути прохождения излучения, являющихся в этом случае т.н. вторичными источниками. Так, если источник излучения имеет размер  $S$  и расположен на расстоянии  $a$  от линзы, то положение изображения источника относительно линзы и его размер  $S_1$  находятся из следующих соотношений:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

$$S_1 = S \frac{f}{a - f}, \quad (2)$$

где  $b$  – расстояние от линзы до плоскости изображения,  $f$  – фокусное расстояние рентгеновской линзы. Фокусное расстояние рентгеновской линзы рассчитывается как:

$$f = R / (2\delta N), \quad (3)$$

где  $N$  – число одиночных линз,  $R$  – радиус кривизны линзы,  $\delta$  – декремент показателя преломления. Из соотношения (1), которое является формулой тонкой линзы, следует, что если расположить источник излучения на расстоянии  $a > 2f$ , то изображение источника будет уменьшенным.

В [2] в качестве источника рентгеновских лучей использовалась галлиевая микрофокусная трубка «Metal Jet» (Excillum™) имеющая размер фокусного пятна –  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>.

В качестве оптического элемента для формирования рентгеновского пучка использовались разработанная в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ многоэлементная преломляющая рентгеновская линза. Линза содержит 161 двояковогнутую сферическую эпоксидную микролинзу с радиусом кривизны поверхности равным 50 мкм. Рентгеновская линза располагалась на расстоянии  $a = 715$  мм от источника. Расчетное фокусное расстояние линзы (формула 3) для энергии падающих фотонов 9,25 кэВ составило  $f = 54,9$  мм. Положение плоскости изображений линзы ( $b = 59,5$  мм) рассчитывалось по формуле (1). На этом расстоянии от линзы располагалась рентгеновская камера. В соответствии с данной геометрией можно ожидать, что в плоскости изображений будет наблюдаться уменьшенное в  $b/a = 12$  раз изображение источника излучения. Проведенные методом «ножа» измерения размера рентгеновского пучка в плоскости изображения показали, что он равен 2,4 мкм. В работе [2] размер рентгеновского пучка определялся при помощи детектора,

который был настроен на заданную энергию фотонов (9,25 кэВ). Поскольку в эксперименте использовался полихроматический рентгеновский пучок от рентгеновской трубки, то возникает вопрос о размытии рентгеновского пучка вследствие хроматических aberrаций линзы.

На рисунке 1 показано формирование рентгеновского пучка рентгеновской линзой для случая полихроматического пучка излучения.

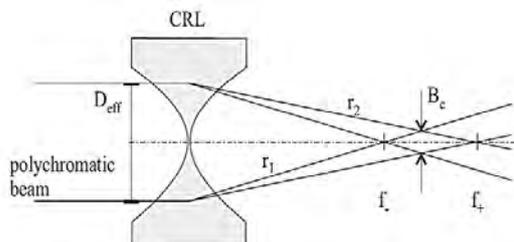


Рисунок 1 – Схема формирования рентгеновского пучка преломляющей линзой для случая полихроматического рентгеновского пучка

Фотоны, которые различаются энергией, фокусируются линзой в различных точках на оптической оси, обозначенных как  $f$  и  $f_+$ . Ширина рентгеновского пучка  $B_c$  вследствие хроматических aberrаций линзы можно рассчитать из геометрических соображений зная апертуру линзы  $D_{eff}$ :

$$B_c = D_{eff} - (2 D_{eff} / f) (f_+ f_- / (f_+ + f_-)), \quad (4)$$

где  $f_{\pm} = f \pm \Delta f$ ,  $\Delta f$  - разница между фокусными расстояниями линзы для двух значений энергии фотонов. Поскольку значение  $f \sim E^2$ , где  $E$  - энергия фотонов, то  $\Delta f / \Delta E = 2f / E$ . Отсюда для ширины рентгеновского пучка  $B_c$  получается следующее значение:

$$B_c = D_{eff} \Delta E / E. \quad (5)$$

Проведенные расчеты показали, что апертура рассматриваемой линзы из-за поглощения  $D_{eff}$  равна:  $D_{eff} = 80$  мкм для фотонов с энергией 9,25 кэВ. Для того, чтобы ширина пучка составляла  $B_c \sim 1$  мкм необходимо, чтобы параметр  $\Delta E$  равнялся 0,115 кэВ, а параметр  $\Delta E / E$  равнялся

$1,24 \times 10^{-2}$ . Таким образом, для получения рентгеновского пучка микронных размеров необходимо использовать кристалл монохроматор, который целесообразно поставить перед рентгеновской линзой. например, графитовый, который характеризуется относительно высоким коэффициентом отражения и обеспечивает требуемую степень монохроматизации.

Второй фактор, который необходимо учитывать при построении фокусирующей системы - это сферические aberrации рентгеновской линзы. Методика расчета сферических aberrаций изложена нами в [3]. Она основана на рассмотрении траекторий лучей, которые формирует фокальное пятно рентгеновской линзы.

В таблице приведены рассчитанные значения радиуса рентгеновского пучка  $R_{ms}$  в фокусе линзы в зависимости от радиуса диафрагмы  $R_d$  для случая линзы, которая использовалась в [2].

$R_d$ , мкм	15	20	25	30
$R_{ms}$ , мкм	0,17	0,4	0,78	1,35

Из таблицы видно, что для того, чтобы осуществить фокусировку рентгеновских лучей в пятно размером 1 мкм необходимо использовать диафрагму с радиусом отверстия, равным 20-25 мкм.

*Благодарности*

Работа поддержана БРФФИ (проект Ф16Р-070) и РФФИ (проект 16-52-00212).

1. Snigirev A. A Compound Refractive Lens for Focusing High-Energy X-rays. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler // Nature.- 1996. -V. 384. - P.52.
2. Дудчик, Ю. Формирование рентгеновских микропучков с использованием короткофокусной преломляющей рентгеновской линзы и лабораторного источника излучения. Ю.И. Дудчик, П.А. Ершов, М.В. Поликарпов, А.Ю. Гойхман, И.И. Снигирева, А.А. Снигирев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – Т. 10. – С. 1–6.
3. Ю.И. Дудчик. Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования микро- и нано- размерных пучков рентгеновского излучения // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2008. – №2. – С. 26–30.

УДК 681

**АЛГОРИТМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОТКАЗАХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

**Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л.**

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**Введение.** Многоканальность или информационная избыточность системы возникает при избыточности датчиков и необходима для ее отказоустойчивой работы. Общая методика решения задач фильтрации в условиях отказов датчиков изложена в публикациях по теории систем со случайной структурой [1, 2]. В имеющихся работах используется статистический подход, в том

числе на основе методологии фильтра Калмана (ФК), что затрудняет решение задачи в реальном масштабе времени.

В настоящей работе рассматривается случай внезапных отказов с их обнаружением по результатам измерений. Решение состоит в обнаружении и исключении канала с неисправным датчиком. При этом производится

реконфигурация фильтра с учетом рабочих каналов измерений.

**1. Исходная модель.** Полезный сигнал  $\mathbf{x}_k$  является случайной последовательностью в виде  $m$ -мерного вектора, каждая компонента которого измеряется посредством параллельного включения  $n_i$  безынерционных линейных датчиков. Модель сигналов и измерений задается в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= A_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{z}_k &= H_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \end{aligned}$$

где  $A_k$  – матрица размерности  $m \times m$ ,  $\mathbf{w}_k$  и  $\mathbf{v}_k$  есть  $m$ -мерные вектора центрированного дискретного белого шума с ковариационными матрицами  $Q_k$  и  $R_k$  соответственно,  $H_k$  – матрица диагонального типа размерности  $N \times m$ ,  $N = \sum_{i=1}^m n_i$  (рис. 1).

$$H_k = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & h_{j+1,i,k} & & \mathbf{0} \\ & \vdots & & \\ \mathbf{0} & h_{j+n_i,i,k} & & \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

Рисунок 1. Структура матрицы измерений

Решение задачи состоит в нахождении уравнений текущей оценки вектора полезного сигнала  $\hat{\mathbf{x}}_k$  на основе выбранного критерия оптимальности и текущих измерений  $\mathbf{z}_k$  рекуррентным методом наименьших квадратов.

**2. Уравнения фильтра.** В основе методики синтеза фильтра наименьших квадратов (ФНК) лежит выбор функционала потерь  $J_k(\hat{\mathbf{x}}_k)$ . Для сформулированных выше исходных данных подходящим вариантом является следующая форма функционала:

$$J_k(\hat{\mathbf{x}}_k) = (\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k)^T R_k^{-1} (\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k) + (\hat{\mathbf{x}}_k - A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1})^T Q_k^{-1} (\hat{\mathbf{x}}_k - A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1})$$

Необходимое условие минимизации функционала потерь  $\min_{\hat{\mathbf{x}}_k} J_k(\hat{\mathbf{x}}_k)$  приводит к уравнению оптимального фильтра

$$\hat{\mathbf{x}}_k = K_{1,k} A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + K_{0,k} \mathbf{z}_k. \quad (1)$$

Здесь матричный коэффициент  $K_{1,k}$  размерности  $m \times m$  имеет форму

$$K_{1,k} = (Q_k^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k)^{-1} Q_k^{-1} \quad (2)$$

и задает экстраполяцию оценки  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  на следующий шаг. Матричный коэффициент усиления  $K_{0,k}$  размерности  $(m \times N)$  определяется равенством

$$K_{0,k} = (Q_k^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k)^{-1} H_k^T R_k^{-1} \quad (3)$$

и позволяет уточнить экстраполированное значение за счет наблюдения  $\mathbf{z}_k$  на текущем шаге фильтрации. Структура уравнения (1) говорит о рекуррентном характере фильтрации.

Резервирование учитывается величиной  $N$ . При отказе одного из датчиков эта величина изменяется, и тем самым меняются значения коэффициентов усиления, что и приводит к изменению параметров оптимального фильтра. Путем эквивалентных преобразований уравнение (1) сводится к структуре фильтра:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = K_{1,k}^* \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + K_{0,k}^* (\mathbf{z}_k - H_k K_{1,k}^* \hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \quad (4)$$

где

$$K_{1,k}^* = A_k, \quad K_{0,k}^* = K_{0,k}. \quad (5)$$

В этом случае структура ФНК и первое слагаемое в формуле (4), определяющие экстраполяцию оценки, совпадают с ФК. Коэффициенты усиления ФНК находятся по формулам (2), (3) или (5), в то время как у ФК это требует решения ковариационного уравнения совместно с уравнением для оптимального коэффициента усиления, что более трудоемко.

**3. Обнаружение отказов.** Величина оптимальных потерь пропорциональна  $z_k^2$ , что дает возможность определения момента отказа по этой переменной. При усреднении по времени переменной  $z_k^2$  получаем выражение:

$$\langle z_k^2 \rangle \approx \tau^{-1} \sum_{r=0}^{\tau-1} z_{k-r}^2 = y_k(\tau),$$

где  $\tau$  есть время усреднения. Уравнение обнаружителя имеет вид:

$$\pi_k = \begin{cases} 1, & \text{если } y_k(\tau) \leq d; \\ 0, & \text{если } y_k(\tau) > d, \end{cases}$$

где  $d$  – порог обнаружения отказа.

Величины  $d$  и среднее время запаздывания находятся путем моделирования по большому числу реализаций  $y_k(\tau)$ .

Сравнение дисперсий ошибок ФК и ФНК дано в работе [3].

**4. Пример.** Исследования с использованием методики, изложенной выше, проводились при значениях параметров:  $a = 0.83$  (длительность корреляции равна 5);  $\sigma_{v_1} = \sigma_{v_2} = 1$ ;  $\sigma_{\sigma_{v_1}} = 2$ ;  $h_1 = 1$ ;  $h_2 = 0.5$ ;  $t_{\sigma_{v_1}} = t_{\sigma_{v_2}} = 1000$ ; время усреднения  $\tau = 100$ .

На рис. 2 а приведена реализация процесса  $z_{1,k}$  на выходе первого датчика с моментом отказа при  $k = 1000$ , а на рис. 2 б реализация процесса  $y_{1,k}(\tau)$ .

Уровень порога  $d = 9.5$  и среднее время запаздывания обнаружения  $\vartheta = 60$ , соответствующее

порогу, определялись по 100 реализациям процесса  $y_{1,k}(\tau)$ .

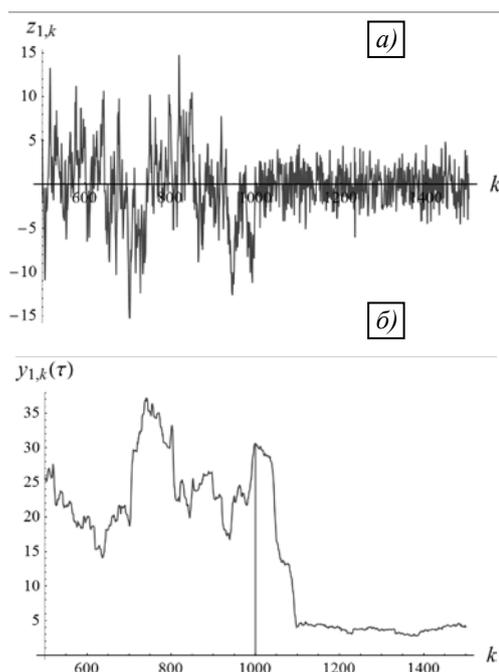


Рисунок 2 – Выход первого датчика: а) результаты измерений ( $z_{1,k}$ ); б) математическое ожидание квадрата измерений ( $y_{1,k}(\tau)$ )

Заключение. Работоспособность фильтра при отказе датчика может быть достигнута путем резервирования. При этом требуется выполнение

операции обнаружения момента отказа, отключения канала отказавшего датчика и изменения алгоритма фильтрации с учетом смены условий функционирования. При статистическом подходе алгоритмы выполнения этой процедуры оказываются весьма сложными и требуют больших вычислительных затрат при реализации в реальном масштабе времени. Сокращение возможно путем перехода от статистического к детерминистскому подходу для синтеза фильтров на основе рекуррентного метода наименьших квадратов. В работе приведена методика такого синтеза и на ее основе получены уравнения фильтра и обнаружителя отказов. Структура этих уравнений получается достаточно простой для реализации и позволяет сохранять работоспособность фильтра при отказах датчиков. Решение конкретного примера демонстрирует технологию использования предложенной методики. Помимо резервирования возможно обеспечение отказоустойчивости алгоритмическим путем, что служит предметом дальнейших исследований.

1. Артемьев, В.М. Теория динамических систем со случайными изменениями структуры / В.М. Артемьев. – Минск: Высшая школа, 1979. – 160 с.
2. Казаков, И.Е. Анализ систем случайной структуры / И.Е. Казаков, В.М. Артемьев, В.А. Бухалев. – М.: Наука, 1993. – 270 с.
3. Артемьев, В.М. Рекуррентная линейная фильтрация случайных последовательностей методом наименьших квадратов с регуляризацией решения / В.М. Артемьев, А.О. Наумов, Л.Л. Кохан // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – № 1. – С. 102–107

УДК 539.121.6/7.07

## ГАММА-РЕЗОНАНСНЫЙ КОНЦЕНТРАТОМЕР ДИОКСИДА ОЛОВА

Лобко А.С.<sup>1</sup>, Мисевич О.В.<sup>1</sup>, Холмецкий А.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Беларусь

Актуальность измерений малых концентраций диоксида олова  $\text{SnO}_2$  (минерала касситерита) в полевых условиях возрастает по мере роста потребностей электронной промышленности во всем мире. Задача гамма-резонансной концентратометрии  $\text{SnO}_2$  была поставлена вскоре после открытия эффекта Мессбауэра. Например, во ВНИИФТРИ (г. Менделеево, РФ) был разработан мессбауэровский анализатор касситерита КМКР, использующий резонансную ионизационную камеру для регистрации рассеянного пробой гамма-излучения. Лабораторные варианты прибора имели предел обнаружения касситерита на уровне 0,01% при времени анализа несколько минут. Однако серийное производство не было организовано из-за невоспроизводимости параметров резонансной ионизационной камеры.

Кроме того, показания КМКР существенно зависели от минерального состава проб.

Повысить точность измерений и снизить влияние состава проб на показания концентратомера удалось в приборе, рассмотренном ниже.

### Зависимость величины резонансного эффекта от концентрации искомого вещества.

Для мессбауэровской концентратометрии с применением резонансного детектора нами было получено [1] соотношение, связывающее величину измеряемого резонансного эффекта

$E = [I(0) - I(\infty)] / I(\infty)$  с искомой концентрацией  $C$ :

$$\varepsilon = \frac{k C + \gamma}{(1 - k_1 C)(1 + aC)}, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$ , определяющий чувствительность прибора, а также параметр  $k_1$  слабо зависят от минерального состава проб. Кроме того,  $k_1 \ll 1$ , что позволяет считать зависимость линейной до концентраций порядка единиц процентов. При больших концентрациях зависимость становится нелинейной из-за влияния параметра  $a$ , который к тому же зависит от вещественного состава.

Для снижения влияния вариаций вещественного состава проб на величину  $a$  и расширения диапазона измерения концентраций оксидного олова в сторону верхних значений, нами предложен модифицированный алгоритм вычисления  $C$ . В его основе лежит учет информации о вещественном составе исследуемых образцов, содержащейся в интенсивности рассеянного ими излучения при расстройке резонанса  $I(\infty)$ :

$$I(\infty) \sim (1 - k_1 C). \quad (2)$$

С учетом (2) получаем новое выражение для связи резонансного эффекта с концентрацией:

$$\varepsilon = \frac{k C + \gamma}{1 - k_1 C + a'' [I(\infty) / I_0] C}, \quad (3)$$

где  $I_0$  – известная интенсивность зондирующего излучения, а параметр  $a''$  практически не зависит от вещественного состава исследуемого образца.

Таким образом, выражение (3) представляет собой основную аналитическую зависимость мессбауэровской концентратометрии в широком диапазоне концентраций, и было положено в основу функционирования прибора.

#### Выбор геометрии измерений и источника излучения.

Один из основных критериев выбора геометрии измерений – реализация достаточно больших углов рассеяния, при которых минимизируется релеевское рассеяние. С другой стороны, геометрия измерений должна обеспечивать работу с мессбауэровским источником  $^{119}\text{Sn}$  достаточно большой площади с целью минимизации потерь излучения на самопоглощение и уширение линии испускания. Оптимальное сочетание этих особенностей реализовано в геометрии, показанной на рис. 1.

Резонансный детектор РД и источник излучения расположены на минимальном расстоянии друг от друга по одну сторону от образца, обеспечивая максимально возможный средний угол рассеяния регистрируемого гамма-излучения. Диаметр чувствительного элемента резонансного детектора – 40 мм, расстояние до пробы – 35 мм.

Свинцовый экран (СЭ) толщиной 2 мм защищает детектор от прямого излучения. Осевая симметрия геометрии измерения позволяет применить источник кольцевой формы (КИ) достаточно большой площади (внешний диаметр источника – 73 мм, внутренний – 53 мм). Начальная активность источника – 2 ГБк, а удельная

поверхностная активность составила около  $10^8$  Бк/см<sup>2</sup>, что позволило практически полностью исключить самопоглощение излучения в источнике и увеличить срок его эксплуатации до 1,5 лет при периоде полураспада изотопа  $^{119\text{m}}\text{Sn}$  290 дней.

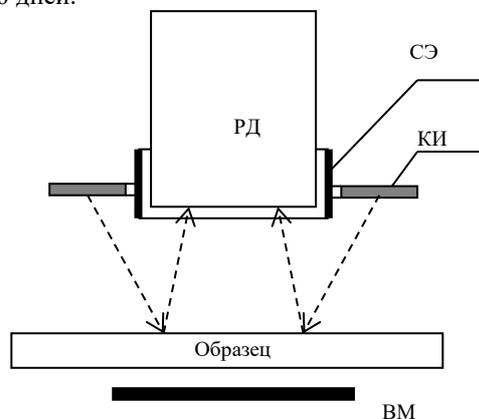


Рисунок 1. Геометрия измерений для мессбауэровской концентратометрии: СЭ – свинцовый экран; КИ – кольцевой источник; ВМ – вспомогательная мишень

#### Стабилизированный резонансный сцинтилляционный детектор для олова-119.

Одним из принципиальных решений, положенных в основу разработки мессбауэровского концентратометра, является использование резонансного детектора для регистрации рассеянного гамма-излучения, позволяющего повысить чувствительность измерений в  $S_a f'$  раз, где  $f'$  – вероятность безотдачного излучения. Наибольшую величину абсолютной селективности  $S_a$  [2] среди известных типов резонансных детекторов для изотопа  $^{119}\text{Sn}$  имеет резонансный сцинтилляционный детектор (РСД). Его основной элемент – тонкий органический сцинтиллятор, в котором растворено вещество конвертора. В качестве конвертора для целей мессбауэровской концентратометрии касситерита было также выбрано соединение  $^{119}\text{SnO}_2$ , для которого максимум резонансного поглощения совпадает с максимумом резонансного поглощения касситерита. Эффективность регистрации безотдачного излучения 23,8 кэВ составляет около 30...40%; нерезонансного излучения – менее 1%. Для преобразования световых импульсов в электрические сигналы использован ФЭУ. Работа с малыми сигналами РСД требует применения оптимизированных схем обработки сигнала. Накопленный нами опыт работы с пластическими сцинтилляторами на низких энергиях [3] позволил реализовать потенциальные преимущества РСД на практике. Абсолютная селективность РСД составила  $S_a \approx 45$ .

Полученное значение  $S_a$  позволяет оценить численное значение коэффициента  $k \approx 250$ . При этом нижний предел измерения концентрации оксидного олова имеет порядок  $10^{-5}$ . В то же время, величина резонансного эффекта при таких концентрациях  $\varepsilon \approx kC \approx 0,003$ , и для реализации

потенциально высокой чувствительности измерений с помощью РСД необходимо обеспечить высокую стабильность его параметров с тем, чтобы изменения в интенсивности регистрируемого излучения в несколько долей процента были бы надежно зарегистрированы. Для этого применена комбинированная система стабилизации энергетической шкалы РСД. Система работает со световым репером в процессе измерения и проводит периодическую подстройку светового репера по радиоактивному источнику измерений. Реперные сигналы от радиоактивного источника формируются при регистрации рассеянного гамма-излучения от вспомогательной мишени (ВМ) из SnO<sub>2</sub> в перерывах между измерениями при удалении образца из зоны измерения (рис. 1). Такая организация системы позволяет обеспечить непрерывную стабилизацию коэффициента передачи РСД с квазиабсолютным репером с погрешностью не хуже 0,1%.

**Основные технические характеристики мессбауэровского анализатора касситерита:**

–диапазон измерения концентрации

SnO<sub>2</sub>, вес. % ..... 0,005–40;

– относительная погрешность измерений

в диапазонах:

0,005–0,01 вес. % ..... 30–20%;

0,01–0,05 вес. % ..... 20–5%;

0,05–0,1 вес. % ..... 5–3%;

0,1–10 вес. % ..... < 5%;

10–40 вес. % ..... <10%;  
 – время анализа ..... от 5 с до 3 мин;  
 – масса порошковой пробы ..... 0,03–0,05 кг;  
 – масса / габариты прибора ..... 8 кг / 38×22×15 см;  
 – питание прибора ..... 9÷13 В DC; 6 Вт.

Результаты опытной эксплуатации приборов в полевых условиях показали их высокую надежность, хорошую воспроизводимость результатов при рекордной для физических методов анализа фазового вещества минимально определяемой концентрации оксидного олова.

1. Mossbauer concentratometry as a new analytical method / A. Kholmetskii, O. Misevich, N. Abramchuk e.a. // Nucl. Instr. and Meth. – 1994. – В94. – Р. 493–498.
2. Сравнение производительности измерений детекторов гамма-излучения для элементного и фазового анализа вещества / А. Лобко, О. Мисевич, А. Холмецкий // Приборостроение: материалы 8-й междунар. науч.-техн. конф./ Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 113–114.
3. Детектирование интенсивных потоков мягкого рентгеновского излучения пластическими сцинтилляторами / А. Лобко, О. Мисевич, А. Федоров // XLII Межд. Тулиновская Конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов / под ред. М.И. Панасюка. – М.: Университетская книга, 2012. – С. 57.

УДК 681

**ПРОГРАММНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДА**

**Колтунович Т.<sup>2</sup>, Костина Г.А.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Самарина А.В.<sup>1</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

В данной работе рассмотрены алгоритмы обработки измерительных сигналов цифрового электрометрического зонда в реальном времени с использованием инструкций библиотеки цифрового сигнального процессора DSP (Digital Signal Processor) управляющего микроконтроллера.

Цифровой электрометрический зонд реализует косвенный метод измерения контактной разности потенциалов [1]. Он выполнен на базе управляющего 32-разрядного микроконтроллера семейства STM32F4 с ядром Cortex M4. Основными преимуществами микроконтроллеров данного семейства является набор инструкций DSP, а также модуль операций с плавающей точкой [2], что обеспечивает максимальную производительность и эффективность обработки измерительных сигналов. Косвенный метод измерения заключается в математическом анализе параметров компенсационной зависимости сигнала измерительного динамического конденсатора при фиксированных потенциалах компенсации.

В цифровом электрометрическом зонде полный измерительный цикл состоит из двух последовательных определений амплитуд сигналов при первом и втором фиксированных потенциалах компенсации и последующего вычисления значения контактной разности потенциалов. Вычисления выполняются путем линейной аппроксимации компенсационной зависимости. Для этого внутренний таймер управляющего микропроцессора осуществляет предварительное деление тактовой частоты до величины в 128 раз большей частоты колебаний эталонного образца. Импульсы таймера управляют считыванием записанной в памяти микроконтроллера таблицы синуса (128 точек) и одновременно записывают полученные отсчеты в буфер памяти микроконтроллера. В этом случае амплитуда измерительного сигнала определяется по четырем периодам колебания зонда, что соответствует 512 точкам.

Массив измерительных данных, для ускорения алгоритмов обработки сигнала, может быть

обработан с помощью модулей сигнального процессора DSP в режиме реального времени. Данная библиотека включает широкий набор функций, к числу которых относится пропорционально-интегрально-дифференциальный контроллер PID (Proportional Integral Derivative controller), функции преобразования Фурье, и широкий набор цифровых фильтров, например, 16-битные рекурсивные IIR (Infinite Impulse Response) и нерекурсивные FIR (Finite Impulse Response) фильтры.

Учитывая необходимость регистрации измерительных токов фемтоамперного диапазона и то, что измерительный динамический конденсатор является открытым, он подвержен влиянию различных дестабилизирующих факторов (наводок, паразитных емкостных связей, шумов и др.). Поэтому для выделения и/или подавления определенных частот могут быть задействованы интегрированные в библиотеку DSP инструкции цифровых фильтров FIR и/или IIR.

В цифровом FIR-фильтре DSP используется следующая модель [3]

$$y(n) = \sum_{k=0}^{n-1} h[k]x[n-k], \quad (1)$$

где  $h[k]$  – коэффициент фильтрации,  
 $x[n-k]$  – отсчет  $[n-k]$  входного сигнала;  
 $n$  – порядок фильтра.

В случае IIR-фильтра в формировании выходных отсчетов сигнала учитываются отсчеты измерительного сигнала и выходные отсчеты самого фильтра, т.е.

$$\begin{aligned} y[n] = & b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots \\ & \dots + b_px[n-Q] - a_1y[n-1] - \\ & - a_1y[n-2] - \dots - a_0y[n-Q], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $b_i$  – коэффициент входного сигнала;  
 $a_i$  – коэффициент обратной связи;  
 $P$  – порядок входного сигнала;  
 $Q$  – порядок обратной связи;  
 $x[n]$  – отсчеты входного сигнала;  
 $y[n]$  – выходные отсчеты фильтра.

Выражение (2) может быть записано в следующем виде

$$y(n) = \sum_{i=0}^P b_i[n-i] - a_k h[n-k]. \quad (3)$$

После цифровой фильтрации может быть выполнено быстрое преобразование Фурье (БПФ) и последующий расчет среднеквадратического значения или амплитудного значения спектральной линии сигнала для статистического вычисления амплитуды сигнала.

Быстрые алгоритмы БПФ в библиотеке DSP являются обратимыми, т.е. вычисления по графу

БПФ могут выполняться как слева направо, так и справа налево. В обоих случаях используются модель Butterfly [3]:

– для случая слева направо

$$y[k_1] = x[k_1] + (x[k_2])e^{-j\omega}, \quad (3)$$

$$y[k_2] = x[k_1] - (x[k_2])e^{-j\omega};$$

– для случая «справа-налево»

$$y[k_1] = x[k_1] + x[k_2], \quad (4)$$

$$y[k_2] = (x[k_1] - x[k_2])e^{-j\omega}.$$

Следует отметить, что модель Butterfly в DSP является типовой и используется практически для всех быстрых преобразований.

За счет программной оптимизации и использования функций библиотеки DSP цифровой электрометрический зонд достигает высокой производительности. Такие операции, как умножение с накоплением или аппаратного деления могут быть выполнены за 1–3 машинных такта, что значительно повышает производительность измерений. Например, в случае выполнения БПФ на 514 точек, время преобразования в 16-ти разрядном блоке составляет 362 мкс. Кроме того, производительность вычисления может быть дополнительно повышена путем синхронизации операций суммы и разности операндов. В случае 16-разрядных данных повышение производительности цифровой обработки данных может быть повышена путем применения инструкции SIMD MAC с последующим суммированием. Следует отметить, что операция умножения с накоплением MAC (Multiply-accumulate) является основной для большинства инструкций DSP (имеет следующий вид:  $Y = Y + A \times B$ , где  $Y$ ,  $A$ ,  $B$  – элементы действительных массивов с автоматическим расчетом адресов массивов). Группа команд MAC STM32F4 включает в себя 2 операции 32-битного MAC, 4 операции 16-битного MAC, 7 операций с 8-битными данными. Результаты операций MAC могут быть представлены как в 8-, 16-, 32-битных, так и в 64-битных числах в зависимости от поставленной измерительной задачи: умножение, умножение с накоплением, умножение с накоплением с 64-битным результатом.

1. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.
2. STM32F3, STM32F4 and STM32L4 Series Cortex-M4: Programming manual: DocID022708 Rev 5. – 2016. – 260 p.
3. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов: 2-е изд. пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2016. – 656 с.

УДК 355.42

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОДНОЗНАЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ РАЗНОСТИ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ДВУХКАНАЛЬНОМ ПАССИВНОМ ГИДРОЛОКАТОРЕ НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Нгуен Д. Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Пеленг объекта определяется на основе разности времени задержки сигнала в двухканальном пассивном гидролокаторе [1]. Время задержки сигнала в каждом канале приема соответствует отклонению середины первого импульса периодического полезного сигнала относительно времени начала накопления [2]. Определение однозначного значения времени задержки (соответственно однозначного значения разности времени задержки) в пассивном гидролокаторе обеспечит выделение полезного сигнала на фоне помех и ревербераций и повышение точности измерения пеленга объекта [3].

Рассматривается принцип появления дополнительных фазовых сдвигов спектральных компонентов путем анализа амплитудно-фазочастотной характеристики (АФЧХ) фильтров и процесс компенсации этих фаз для определения однозначного значения времени задержки полезного сигнала способом когерентного накопления спектральных составляющих.

При выделении спектральных составляющих полезного сигнала с помощью цифровых фильтров БПФ, базовая частота сигнала не всегда совпадает с частотой резонанса фильтра.

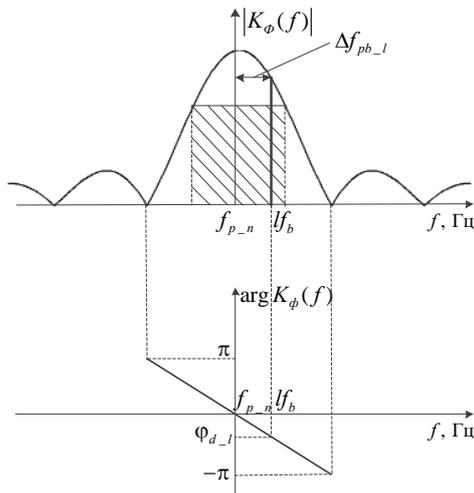


Рисунок 1 – АФЧХ фильтров и объяснение появления дополнительных фазовых сдвигов, возникающих из-за несовпадения базовой частоты гармоники полезного сигнала и резонансной частоты фильтра, в который она попала

На рисунке 1 представлена АФЧХ одного фильтра БПФ с номером  $n$  для выделения спектральных составляющих полезного сигнала и

объяснение появления дополнительного фазового сдвига  $\varphi_d$ . Используются обозначения:  $f_{p-n}$  – резонансная частота фильтра БПФ с номером  $n$ ;  $f_b$  – базовая частота сигнала, Гц.

При попадании спектральной составляющей сигнала с частотой  $lf_b$  в фильтр с номером  $n$  но не равной резонансной частоте фильтра появляется дополнительный фазовый сдвиг  $\varphi_{d-l}$ ,  $l = \overline{1, L}$ , где  $L$  – число спектральных составляющих сигнала при когерентном накоплении. Этот сдвиг определяется разностью частот  $\Delta f_{pb-l}$  и ФЧХ фильтра.

Для повышения отношения сигнал/помеха в полосе пропускания фильтра при обнаружении объекта способом когерентного накопления надо учесть дополнительные фазовые сдвиги  $\varphi_{d-l}$  накапливаемых спектральных составляющих с частотами  $lf_b$ . При реализации способа когерентного накопления компенсация фаз для всех выбранных спектральных составляющих проводится с учетом компенсации дополнительных фазовых сдвигов, тогда выражение для квадрата модуля суммы спектральных составляющих имеет вид

$$|\xi_{\Sigma_{kom}}(t_Z)|^2 = \left| \sum_{l=1}^L G_l(f_b) \exp(-j \cdot 2\pi \cdot lf_b \cdot t_Z - j\Delta\varphi_{d-l}) \right|^2,$$

где  $G_l(f_b)$  – спектральная составляющая сигнала с частотой  $\omega(l) = l2\pi f_b$ .

Рассмотрим результаты моделирования. Если полезный сигнал описывается некоторой функцией времени  $u_s(t)$ , то на выходе акустоэлектрического преобразователя приемной антенны формируется смесь полезного сигнала, сигналов ревербераций и помех [4]:

$$u(t) = Au_s\left(t - \frac{r_0}{C_v}\right) + \sum_j^{J_R} a_j u_s\left(t - \frac{r_j}{C_v}\right) + u_n(t),$$

где  $A$ ,  $r_0$  – амплитуда полезного сигнала и расстояние между объектом и приемной антенной;  $J_R$  – число отражателей, от которых создаются переотражения (реверберации) полезного сигнала;  $a_j$ ,  $r_j$  – случайные величины, соответствующие амплитудам и расстояниям по линии распространения  $j$ -й волны ревербераций,

$j = \overline{1, J_R}$ ;  $u_n(t)$  – помеха.

При моделировании представим полезный сигнал как последовательность видеоимпульсов с прямоугольной огибающей со следующими параметрами: частота повторения полезного сигнала  $f_r = 20$  Гц; длительность импульса  $T_0 = 3$  мс; истинное значение времени задержки сигнала  $t_{Z\_ist} = 15$  мс;  $u_n(t)$  – помеха в виде белого шума в полосе приема; число спектральных составляющих при когерентном накоплении  $L = 8$ ; число ревербераций при моделировании  $J_R = 2$ .

Время задержки определяется максимальной квадрата модуля суммы спектральных составляющих сигнала [2]. На рисунке 2 показана зависимость значения квадрата модуля суммы, формируемой без компенсации дополнительных фазовых сдвигов и предствленной в виде:

$$|\xi_{\Sigma\_bez}(t_Z)|^2 = \left| \sum_{l=1}^8 G_l(f_r) \exp(-j \cdot 2\pi \cdot l f_r \cdot t_Z) \right|^2.$$

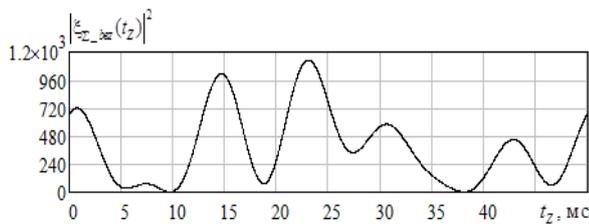


Рисунок 2 – Зависимость  $|\xi_{\Sigma\_bez}(t_Z)|^2$  от времени задержки

Из рисунка 2 видно, что на графике имеет два максимума:

первый  $|\xi_{\Sigma\_bez}(t_Z = 0,023 \text{ c})|^2 = 1127$ ;

второй  $|\xi_{\Sigma\_bez}(t_Z = 0,01495 \text{ c})|^2 = 1006$ .

Появление нескольких максимумов, это приводит к неоднозначному определению значения времени задержки полезного сигнала. Неправильное определение времени задержки приводит к ошибке измерения разности времени задержки сигнала в двухканальном пассивном гидролокаторе и, соответственно, к ошибке измерения пеленга объекта.

Далее рассмотрим результат определения времени задержки сигнала при когерентном накоплении спектральных составляющих с компенсацией дополнительных фазовых сдвигов. Результат расчета дополнительных фазовых сдвигов для 8 первых накапливаемых спектральных составляющих (СС) полезного сигнала показан в таблице.

На рисунке 3 показана зависимость квадрата модуля суммы  $|\xi_{\Sigma\_kom}(t_Z)|^2$  от времени задержки

при компенсации дополнительных фазовых сдвигов.

№ СС	Частота СС, Гц	Номер фильтра, в который попадает СС	$\Phi_{d\_l}$ , рад.
1	$f_r$	59	0,168
2	$2f_r$	119	-1,392
3	$3f_r$	178	0,358
4	$4f_r$	238	-1,034
5	$5f_r$	297	0,715
6	$6f_r$	357	-0,677
7	$7f_r$	416	1,073
8	$8f_r$	476	-0,319

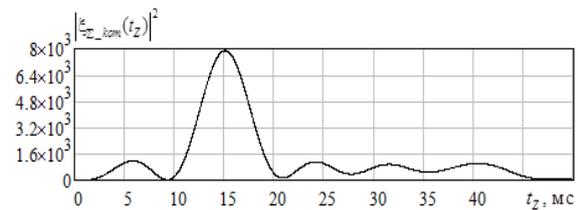


Рисунок 3 – Зависимость  $|\xi_{\Sigma\_kom}(t_Z)|^2$  от времени задержки

Из рисунка 3 видно, что зависимость имеет только один максимум  $|\xi_{\Sigma\_kom}(t_Z = 0,015 \text{ c})|^2 = 7873$ .

Из результатов видно, что при компенсации дополнительных фазовых сдвигов уровень максимума квадрата модуля суммы повышается в  $7873 / 1006 = 7,82$  раза (соответственно и отношение сигнал/помеха), что обеспечивает точное определение времени задержки полезного сигнала  $t_Z = t_{Z\_ist} = 15$  мс.

1. Гейстер С. Р., Нгуен Д. Н. Измерение пеленга движущихся объектов с использованием когерентного накопления спектральных составляющих сигнала в пассивном гидролокаторе // Доклад БГУИР. – 2017. – № 3 (105). – С. 52–57.
2. Гейстер С. Р., Нгуен Д. Н. Способ когерентного накопления спектральных составляющих принятого сигнала в пассивном гидролокаторе // Наука и военная безопасность. – 2016. – № 3(50). – С. 36–38.
3. Нгуен Д. Н. Анализ возможностей защиты от сигналов реверберации в пассивном гидролокаторе при когерентном накоплении спектральных составляющих // Технические средства защиты информации: материалы XV Белорусско-российской научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 6 июня 2017 г. – С. 32.
4. Ольшевский В. В. Статистические свойства морской реверберации. – М.: Наука, 1966. – 205 с.

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОР АВТОМОБИЛЬНЫХ ВЕСОВ**

Савченко А.Л.<sup>1</sup>, Минченя Н.Т.<sup>1</sup>, Журавский А.А.<sup>2</sup>, Берхин Е.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный институт метрологии

<sup>3</sup>ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

В автоматизированных системах контроля и учета материальных потоков (АСКУМП) значительную роль играют весоизмерительные устройства. В частности, весы широко используют при взвешивании транспортных средств – автомобилей, вагонов. При этом все чаще в АСКУМП включают устройства, позволяющие взвешивать транспортные средства в движении. Это позволяет повысить производительность контроля.

Достаточно популярным решением для взвешивания автомобилей в движении являются устройства для поосного или поколесного взвешивания.

Следует отметить, что в процессе работы весоизмерительного устройства на упругих опорах возникают колебания подвижной системы, которые вносят свою долю в общую погрешность взвешивания. Величина возникающей динамической погрешности зависит от скорости движения взвешиваемого автомобиля. При этом допустимая скорость не ограничивается ни в настоящее время отмененным ГОСТ 30414-96 [1], ни действующим СТБ 1845 [2], ни межгосударственными стандартами [3, 4].

В статье рассматривается динамика пружинной весоизмерительной системы на основе цилиндрических прорезных пружин. Учет динамических характеристик упругой системы при проектировании и изготовлении весов позволит повысить достоверность результатов взвешивания.

Упругую систему весов схематично можно представить, как показано на рис. 1.

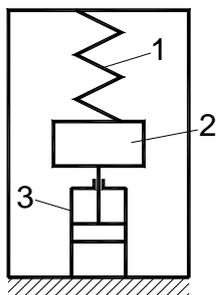


Рисунок 1 – Модель упругой системы весов

Позицией 1 обозначен упругий элемент весов, 2 – подвижная масса, включающая грузоприемное устройство и взвешиваемый объект, 3 – демпфер (успокоитель колебаний). При помещении взвешиваемого объекта на грузоприемное устройство система совершает затухающие

колебания, которые можно описать дифференциальным уравнением второго порядка:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = mg,$$

где  $m$  – суммарная масса взвешиваемого объекта и грузоприемного устройства;  $c$  – коэффициент демпфирования;  $k$  – жесткость пружины,  $x$  – перемещение подвижной массы.

Исследуемая цилиндрическая прорезная пружина представляет собой трубу с прорезями, параллельными торцам и расположенными друг под другом в шахматном порядке (рис. 2).

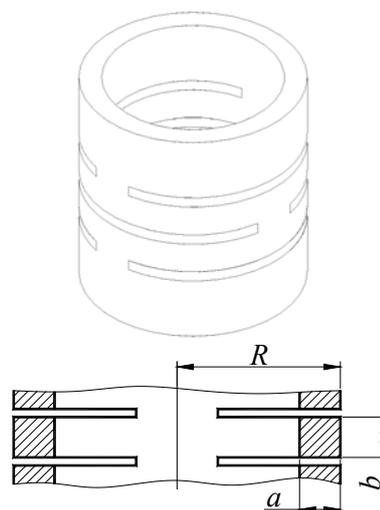


Рисунок 2 – Цилиндрическая прорезная пружина

Статические характеристики пружины описаны в [5].

Деформация пружины обычно не превышает 1...2 мм. Для преобразования деформации в электрический сигнал возможно использование индуктивных и дифференциально-трансформаторных датчиков. Авторами разработано несколько конструкций весоизмерительных устройств с цилиндрическими прорезными пружинами [6]. Весоизмерительная опора показана на рис. 3.

Для экспериментального определения коэффициента демпфирования пружины использовались импульсные переходные характеристики (функции веса). Для их получения были взяты пружины с одинаковыми габаритами, но с различной высотой колец  $b$  (см. рис. 3), то есть с разной жесткостью. Пружины подвергались ударной

нагрузке, после приложения которой регистрировалась деформация с помощью встроенного в опору бесконтактного индуктивного преобразователя. По полученным функциям веса в соответствии с [7] рассчитывался коэффициент демпфирования (рис. 4):

$$\xi = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}}, \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2}$$

В ходе обработки результатов эксперимента было установлено, что коэффициент демпфирования не зависит от жесткости пружин, а только от их габаритов и материала. Для пружин с габаритами, пригодными для создания весоизмерительных опор, изготовленными из стали ШХ15 с закалкой, величина коэффициента демпфирования составила примерно 150000 Н·с/м.



Рисунок 3 – Весоизмерительная опора (защитный кожух снят)

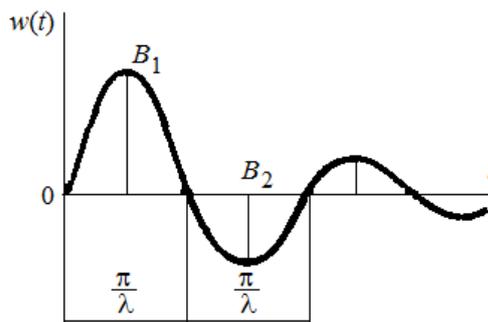


Рисунок 4 – Функция веса

1. ГОСТ 30414-96. Весы для взвешивания транспортных средств в движении. Общие технические требования. – Введ. 01.07.1998. – М.: Изд. стандартов, 1997. – 8 с.
2. СТБ 1845-2008. Весы автоматические для взвешивания транспортных средств в движении. Общие требования и методы испытаний. – Введ. 31.03.2008. – Минск: Госстандарт, 2008. – 39 с.
3. ГОСТ 33242-2015. Весы автоматические для взвешивания транспортных средств в движении и измерения нагрузок на оси. Метрологические и технические требования. Испытания – Введ. 27.02.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – 58 с.
4. ГОСТ 8.646-2015. Весы автоматические для взвешивания транспортных средств в движении и измерения нагрузок на оси. Методика поверки – Введ. 27.02.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – 18 с.
5. Детали машин. Расчет и конструирование: справочник: в 5 т. / Под ред. Н.С. Ачеркана. – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 2. – 408 с.
6. Минченя, Н.Т., Савченко А.Н. Весоизмерительное устройство к дозатору компонентов бетонных смесей / Наука и технологии на рубеже XXI века: материалы МНТК. – Минск, 2000. – С. 491–495.
7. Бесекинский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекинский, Е.П. Попов. – СПб.: Професия, 2004. – 752 с.

УДК 504.064, 681.785

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Усольцев В.П., Уразманова О.И.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова  
Ижевск, Российская Федерация

Облик современной цивилизации во многом определяет переработка и хозяйственное применение углеводородных систем. Производства по переработке углеводородных систем играют ключевую роль в мировом топливно-энергетическом комплексе и нефтехимии. По некоторым данным в отечественной нефте-газоперерабатывающей промышленности "выбрасывается" в атмосферу около 0,45% перерабатываемого сырья, со сточными водами нефтеперерабатывающих предприятий в водоемы поступает значительное количество нефтепродуктов, сульфидов, хлоридов, соединений азота, фенолов, солей тяжелых металлов, взвешенных веществ и др. На

нефтеперерабатывающих заводах, нефтебазах происходит загрязнение почвенного слоя нефтепродуктами на значительную глубину, а в подпочвенных горизонтах образуются линзы нефтепродуктов, которые с грунтовыми водами могут мигрировать, загрязняя окружающую среду и создавать аварийные ситуации.

Развитие городов и промышленных районов, а также градостроительная политика последних десятилетий привели к тому, что большинство предприятий по переработке углеводородных систем, включая нефтеперерабатывающие и нефтехимические производства, оказались в черте городских мегаполисов. Ежегодно на предприятиях

происходят аварии, материальный ущерб от которых исчисляется сотнями миллионов долларов. Ежегодно на предприятиях отрасли происходит порядка 50 крупных аварий и около 20 тыс. случаев, сопровождающихся значительными разливами нефти, попаданием ее в водоемы, большими материальными потерями.

Действующая сегодня в России система анализа и контроля нормируемых химических и микробиологических показателей воды основана на дифференцированном определении их концентрации и сопоставлении ее с нормируемыми значениями. Для водных объектов хозяйственно-бытового и культурно-бытового использования выявлено и нормировано около тысячи вредных веществ и около 700 веществ для рыбо-хозяйственных водоемов. При этом существующие методы анализа могут выявить превышение предельно допустимых концентраций лишь 10% общего количества нормированных веществ. К тому же, процессы эти сложны и длительны. Чтобы определить все показатели воды, нужно иметь соответствующее техническое оснащение, научный и технический потенциал, средства на приобретение реактивов.

Существующая система обеспечения единства измерений физических параметров жидких сред на современной промышленной метрологически аттестованной аппаратуре разработана достаточно хорошо только для традиционных показателей, измерения проводятся стандартизованными “лабораторными” методами, характеризующимися исключительной надежностью. Но эти методы анализа длительны и трудоемки (результаты можно получить только через 24-48 ч), их нельзя реализовать в системе автоматизированного контроля и трудно использовать в полевых условиях. На сегодняшний день существуют следующие методы анализа воды, которые могут быть использованы для экспресс-анализа: титрометрия, потенциометрия, спектрофотометрия, турбидиметрия, нефелометрия, кондуктометрия, атомно-абсорбционная спектрофотометрия, фотометрия и пламенная фотометрия, газовая хроматография, флуориметрия.

Широкое распространение получили оптические методы анализа неоднородных жидких сред, основанные на измерении пропускания, поглощения или рассеяния света анализируемыми веществами в области ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных волн. Данные методы различаются в зависимости от характера взаимодействия анализируемого вещества со световой энергией, способа ее измерения и спектральных характеристик используемой оптоэлектронной измерительной аппаратуры [1].

Для повышения достоверности, объективности, оперативности оптоэлектронного контроля загрязнения сточных вод, снижения длительности кон-

троля, исключения влияния методики и аппаратуры контроля на санитарно-бактериологические свойства контролируемых проб, использована регистрирующая аппаратура, работающая в видимом оптическом диапазоне 0,38 – 0,78 мкм. В результате анализа спектров поглощения воды, как основного компонента сточных вод, и загрязнителей в виде нефти, нефтепродуктов, масел выбран рабочий диапазон частот от 0.25 до 0.65 мкм. В этом диапазоне вода достаточно прозрачна, что позволяет оптическому излучению проникать на большую глубину, а следы загрязнений, даже небольшого размера, хорошо различимы.

Проведение натуральных экспериментов на специализированной экспериментальной установке [2], разработанной на основе имитационной модели поступления загрязнения сточных вод на очистные сооружения [3], позволяющей имитировать любое из распространенных загрязнений, вид, содержание и концентрацию загрязнений, влияние факторов, снижающих достоверность контроля, и позволило экспериментально обосновать выбор спектральных характеристик источников и приемников излучения, их количества и модель. Эксперименты проводились с тремя источниками оптического излучения: синим (450–480нм), зеленым (510–550 нм), красным ( $\geq 630$  нм) и приемником излучения со спектральной областью чувствительности 0,4–1,1 мкм.

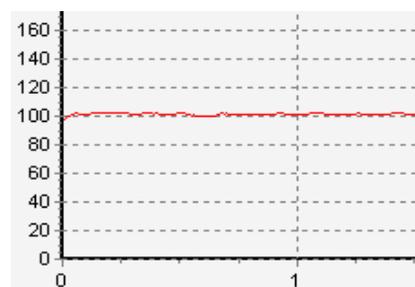


Рисунок 1 – График изменения оптической плотности при протекании загрязнения в виде сырой нефти и зеленом источнике излучения

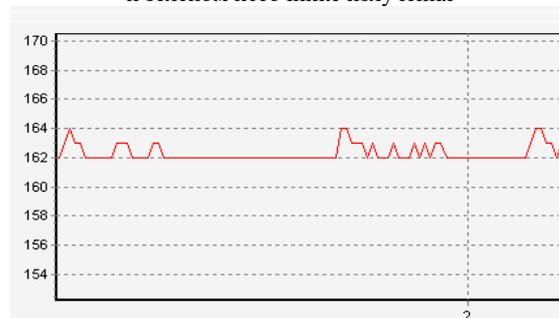


Рисунок 2 – График изменения оптической плотности при протекании загрязнения в виде сырой нефти и синем источнике излучения

При загрязнении в виде сырой нефти, источнике излучения с длиной волны  $\lambda=0,5$  мкм, средней мощностью излучения  $P_{cp}=1$  мВт, приемнике

излучения с областью спектральной чувствительности 0,3-1,1 мкм, максимальной спектральной характеристикой 0,75-0,85 мкм, рабочим напряжением 10В, интегральной токовой чувствительностью не менее 3,5мА/лм полученный график приведен на рисунке 1.

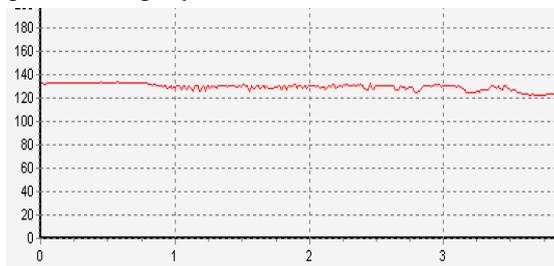


Рисунок 3 – График изменения оптической плотности при протекании загрязнения в виде сырой нефти и красном источнике излучения

Аналогичные опыты проведены с двумя источниками излучения с длиной волны  $\lambda = 0,4$  мкм и  $\lambda = 0,7$  мкм, графики приведены на рисунках 2 и 3.

На графиках наглядно видны изменения, полученные в результате замены лазерного излучателя. Меняя лазерный излучатель, можно зафиксировать изменения показателей импульсного сигнала.

УДК 621.3.049.77: 681.586

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Паршков А.В., Сушко В. А.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Республика Беларусь

В устройствах контроля линейных перемещений (расстояния до объекта) применяются чувствительные элементы (датчики), основанные на различных принципах работы: емкостные, стрикционные, потенциометрические, индуктивные, магнитометрические, оптические, ультразвуковые и др.

Одним из наиболее распространенных датчиков линейных перемещений являются ультразвуковые (УЗ) датчики [1-2], в состав которых входят излучатель и приемник ультразвуковых волн. Излучатель формирует короткие импульсы звука с определенной периодичностью. Импульсы отражаются от предметов и препятствий и возвращаются обратно, где фиксируются при помощи приемника. Структурная схема УЗ-датчика показана на рисунке 1. На рисунке 2 представлена временная диаграмма, иллюстрирующая работу УЗ-датчика. Фиксируя время между посылкой импульса и приходом отраженного сигнала (эхо-импульса) и зная скорость распространения звука рассчитывается расстояние до объекта по формуле:

$$L = \frac{t * V}{2}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние  $t$  – время эхо-импульса,  $V$  – скорость ультразвука.

Эксперименты показывают, что с помощью трехчастотного зондирования можно наиболее точно распознать вид загрязнения, улучшить показатели качества на выходе сточных вод. По результатам экспериментов может быть составлена база данных, использование которой позволяет выбрать зависимость для каждого конкретного случая.

1. Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И. Контроль загрязнений сточных вод и промышленных стоков с использованием двухчастотного лазерного зондирования // Безопасность в техносфере, 2017, №1. – С. 3–9.
2. Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И. Система интерполяционного контроля загрязнений сточных вод природно-промышленных территориальных комплексов / Приборостроение - 2016 : материалы 9-й Международной научно-технической конференции, 23-25 ноября 2016 года, Минск, Республика Беларусь / пред. редкол. Гусев О. К.; ред. Гурина Е. В. [и др.]. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 15–16. – 480 с.
3. Усольцев В.П., Юран С.И. Достоверность санитарно-эпидемиологического анализа сточных вод при большом количестве случайных воздействий и отсутствии доминирующего фактора // Теоретическая и прикладная экология. – 2016. – № 3. – С. 19–24.

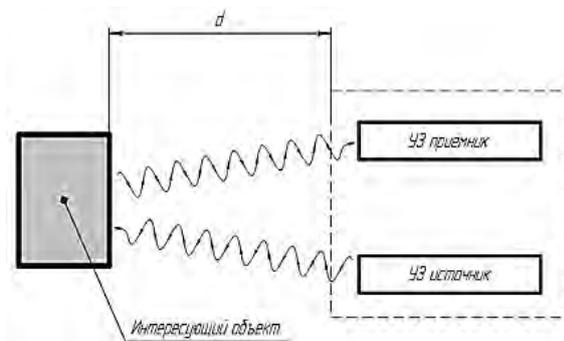


Рисунок 1 – Структурная схема УЗ-датчика

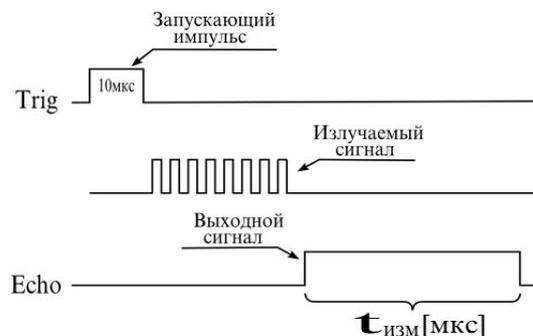


Рисунок 2 – Временная диаграмма, иллюстрирующая работу УЗ датчика

В работе представлены результаты разработки функционального электронного модуля (ФЭМ) контроля линейных перемещений на базе УЗ-датчика HC-SR04, работающего на центральной частоте 40 кГц, диаграмма направленности которого показана на рисунке 3.

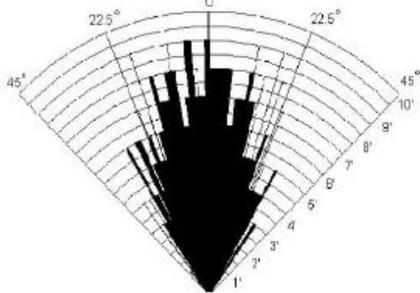


Рисунок 3 – Диаграмма направленности УЗ-датчика HC-SR04

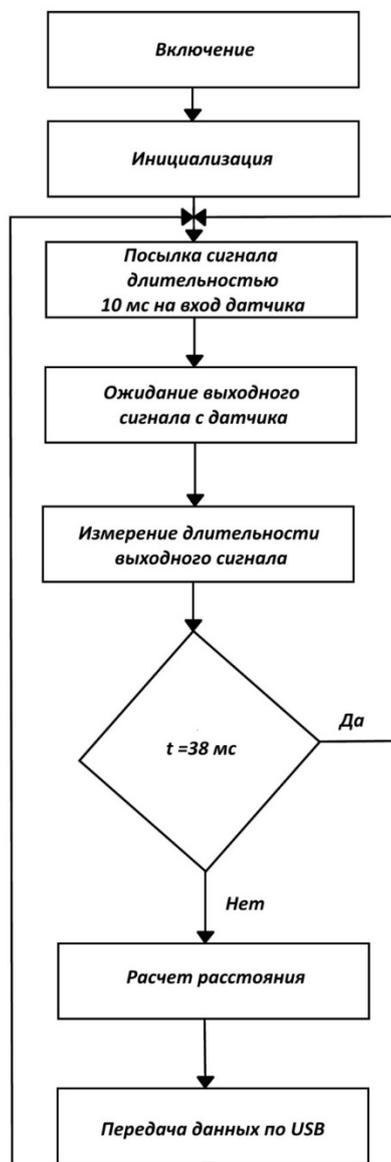


Рисунок 4 - Алгоритм функционирования ФЭМ на базе УЗ-датчика HC-SR04

Выбранный датчик обеспечивает возможность измерения линейного расстояния в пределах 0,02–4,0 м с точностью 5–10 мм.

Для цифровой обработки измерительных сигналов, поступающих в измерительную схему ФЭМ с УЗ-датчика, использовался 32-разрядный микроконтроллер семейства STM на ядре ARM Cortex-M3, основными преимуществами которого являются:

- наименьшее энергопотребление для обеспечения одинакового значения производительности по сравнению с другими ядрами при более низкой тактовой частоте;
- возможность программирования с оптимизацией либо скорости 32-разрядного ядра ARM, либо с оптимизацией размера программного кода при использовании 16-разрядных Thumb-команд, обеспечивающих максимальную гибкость при проектировании;
- наличие встроенной Flash-памяти, обеспечивающей высокую производительность, возможность универсального программирования, возможность секторной защиты записи от нежелательной записи.

На рисунке 4 представлен алгоритм функционирования ФЭМ на базе УЗ-датчика HC-SR04.

В качестве регистратора данных ФЭМ был использован персональный компьютер (ПК) Intel Pentium G 2.8 ГГц с характеристиками: объем ОЗУ не менее 2 Гбайт, разрешение экрана монитора не менее 10254x746 пикселей, наличие порта USB.

На рисунке 5 представлены виртуальные панели измерительных окон ПК, подключенного к ФЭМ.

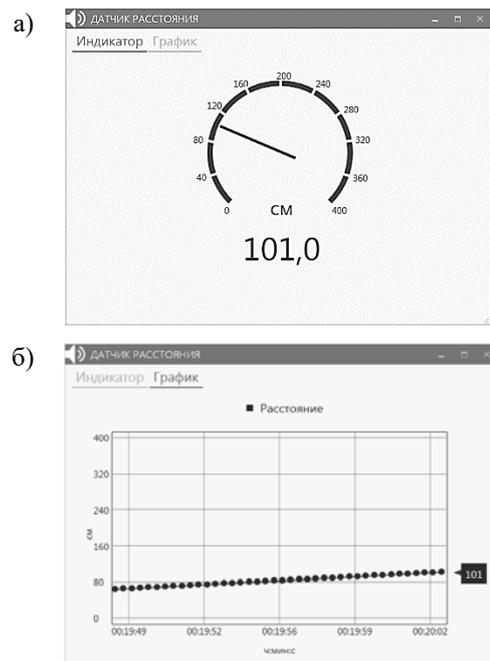


Рисунок 5 – Окно виртуальной панели ФЭМ: а) режим индикатора; б) режим графического отображения результатов

Разработанный модуль позволяет решать комплексные измерительные задачи при выполнении физических экспериментов в научных и учебных лабораториях. Разработанное ПО дает возможность обеспечивать математическую обработку полученных данных и их отображение на экране ПК в виде гистограмм, графиков, таблиц.

УДК 536.2.081.7:57.087.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО РАЗОГРЕВА ТЕРМИСТОРА

Матвиенко А.Н., Терещенко Н. Ф., Матвиенко С.Н.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Всестороннее исследование свойств биологических материалов, в том числе и их теплофизических свойств (ТФС), а в частности теплопроводности, вызывает необходимость разработки соответствующей аппаратуры и создания методик исследований. Коэффициент теплопроводности является эффективным показателем процессов различного рода, протекающих в биологических жидкостях. Так в медицине, для определения наличия и степени иммунологической зависимости применяют метод иммунотермистометрии, который заключается в сравнении отклонения ТФС смеси кровь+аллерген с теплофизическими свойствами контрольной жидкости.

К числу наиболее эффективных методов определения теплопроводности могут быть отнесены методы неразрушающего контроля. С их помощью можно получать информацию о теплопроводности при максимальном сохранении естественной структуры исследуемого биологического материала. Кроме того, с помощью неразрушающих методов может быть достигнута наиболее высокая производительность измерений, так как они не требуют трудоемкой подготовки исследуемых материалов.

По мнению исследователей [1] для определения коэффициента теплопроводности биологических материалов одним из самых эффективных методов есть метод прямого подогрева термистора, который использует способность термистора к саморазогреву при прохождении через него электрического тока. При этом коэффициент теплопроводности исследуемого материала определяется по формуле [2]

$$\lambda = \frac{P_T}{4\pi r \Delta T}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности исследуемой жидкости, Вт/(м К);  $P_T$  – мощность термистора, Вт;  $r$  – радиус термистора, м;  $\Delta T$  – температура разогрева термистора, °С.

Наличие оболочки у термистора вызывает необходимость введения в расчетную формулу

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. Москва: Техносфера, 2007. –384 с.
2. Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS-технологии. Часть 1. Инерциальные датчики средней точности. А. Тузов. //Электроника:наука, технология, бизнес. №1. – 2011.

(1) дополнительных коэффициентов пропорциональности, которые определяются путем тестирования термисторов с применением эталонных жидкостей с известными ТФС.

Учитывая этот факт формула приобретает вид [2, 3]

$$\lambda_{д.р.} = \frac{P_T}{4\pi r (\Delta T_e - \Delta T_0) * \frac{1}{K_o}}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{д.р.}$  – коэффициент теплопроводности исследуемой жидкости, Вт/(м.К);  $P_T$  – мощность термистора, Вт;  $r$  – радиус термистора, м;  $\Delta T_e$  – измеренная с помощью исследовательской установки температура разогрева термистора, °С;  $\Delta T_0$  – температура разогрева термистора, вызванная наличием оболочки у термистора и измеренная в результате калибровочных тестов с использованием эталонных жидкостей, °С;  $K_o$  – коэффициент пропорциональности, который определяется в результате калибровочных тестов с использованием эталонных жидкостей. Он характеризует чувствительность термисторного зонда к значению коэффициента теплопроводности исследуемой жидкости, в которую помещен зонд.

В данной работе рассмотрены результаты измерений смеси крови и физраствора (0,9% раствор NaCl в дистиллированной воде), который имеет ТФС близкие к ТФС жидких аллергенов. Смесь является комплексной по составу и может со временем разделяться на фракции. Измерения коэффициента теплопроводности проводились с помощью исследовательской установки (рис.1), которая предварительно калибруется на эталонных жидкостях с известными коэффициентами теплопроводности. Установка имеет два измерительных зонда, измерительный блок и термостат. Обработка результатов измерений осуществляется с помощью персонального компьютера, подключенного к измерительному блоку.

Исследуемые жидкости в объеме 350 мкл размещаются в пробирке, помещенной в термостат. Он нагревает исследуемые смеси до темпе-

ратуры +36 °С. После нагревания оператор погружает в измерительную среду термисторные зонды, включенные по мостовой схеме, и запускает начало измерения на ПК.

После получения команды о начале измерения микроконтроллер измерительного блока, с помощью ключа, подает напряжение на измерительные мосты в течение 6 секунд. Электрический ток, протекающий через термистор нагревает его изменяя температуру термистора. Собственная температура термистора пропорциональна коэффициенту теплопроводности жидкости в которую он погружен. Изменение температуры приводит к изменению сопротивления термистора, а следовательно и к разбалансу измерительного моста. Разница потенциалов измерительной диагонали моста измеряется с помощью аналогово-цифровых преобразователей и в цифровом виде подается в микроконтроллер, где он проходит предварительную статистическую обработку и хранится как массив данных до конца измерительного цикла.

В течение следующих 20 секунд на измерительный мост не поступает напряжение, и термистор охлаждается. Поэтому время выполнения одного цикла составляет 26 секунд. Во время охлаждения термистора происходит передача результатов первого цикла в ПК через интерфейс USB.



Рисунок 1

Исследования были проведены с использованием смеси крови и физраствора в пропорции 1:1 10 пациентов. Измерения проводились сеансами по 10 мин. двумя зондами одновременно (количество сеансов -10) в трех положениях термистора:

- в верхней части пробирки, где находятся более легкие фракции смеси;
- в нижней части пробирки, где осели более тяжелые фракции;

- на границе раздела фракций.

Результаты измерений приведены в таблице на рис. 2.

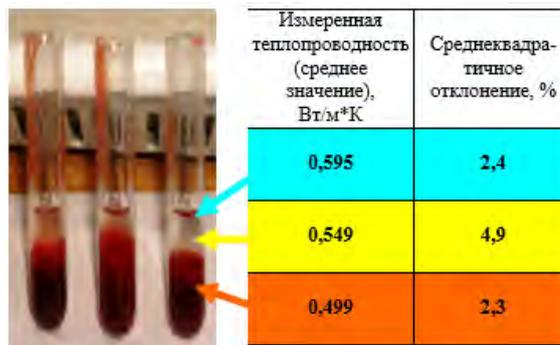


Рисунок 2

**Выводы.** Исследования обусловлены необходимостью разработки методики измерений ТФС биологических материалов. Смесь крови и физраствора по истечению некоторого времени после смешивания разделяется на слои с различными ТФС, что затрудняет процесс точного измерения. По данным измерений выяснилось, что измеренное значение теплопроводности смеси кровь+физраствор в верхней части пробирки больше на ~12% от значения, измеренного в нижней части пробирки, тогда как среднеквадратичное отклонение приблизительно одинаковое. Среднеквадратичное отклонение значения на границе раздела почти в два раза больше, что объясняется нестабильным положением термистора относительно границы раздела. Таким образом, измерение и сравнение ТФС различных неоднородных жидкостей можно проводить путем сравнения ТФС разделенных фракций жидкости или, если это возможно, при постоянном перемешивании исследуемой жидкости. При измерении ТФС и одновременном перемешивании следует учитывать явление конвекции, которое будет влиять на результат измерений.

1. M. F. van Gelder A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Dissertation of Doctor of Philosophy in Biological Systems Engineering / Maarten F. van Gelder. – Blacksburg, Virginia, 1998. – 160 p.
2. S. Matvienko, S. Vysloukh, O. Martynchyk Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 4, No.5(82). - P. 20-30.
3. S. Matvienko, S. Vysloukh, O. Martynchyk Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method /// International Journal of Engineering Research and Science. – 2016. – Vol.2, Iss. 5. – P.250-258.

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Терещенко Н. Ф.<sup>1</sup>, Цапенко В. В.<sup>1</sup>, Чухраев Н. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

<sup>2</sup> *Научно-методический центр «Медицинские инновационные технологии», Киев, Украина*

Электропроводимость (ЭП) биологических систем - это количественная характеристика способности живых объектов (тканей) проводить электрический ток, обратно пропорциональна величине электрического сопротивления системы. Измерения электропроводимости используют для получения информации о функциональном состоянии биологических тканей (БТ), для выявления и лечения воспалительных процессов, изменения проницаемости клеточных мембран и стенок сосудов при патологии или воздействия на организм физических, химических и других факторов. Измерения ЭП лежат в основе многих методов диагностики - оценки кровенаполнения сосудов органов и тканей. [1]

Знание и понимание зависимости механизмов взаимодействия и эффектов, возникающих в биотканях, от частоты внешнего электрического поля, электромагнитного воздействия, позволяет:

- повысить точность определения биофизических и физиологических параметров исследуемых биологических объектов;
- построить физически обоснованное адекватное математическое описание механизмов взаимодействия и возникающих эффектов;
- обосновать медико-технические требования при разработке технических средств: терапевтических аппаратов, диагностических приборов, систем и комплексов;
- обеспечить соответствие допустимым безопасным уровням внешних электромагнитных воздействий, санитарным нормам.

Данные измерения направлены на изучение и экспериментальное исследование зависимости ЭП от частоты воздействующего тока, диэлектрических свойств и полного импеданса БТ при пропускании через биологическую структуру переменного электрического тока низко- и среднечастотного диапазона от 50 до 44 кГц. Практическое применение результатов нацелено на использование в научно-исследовательских работах по направлениям импедансной реографии и биоимпедансного анализа состава тела человека, для повышения точности измерений, разработки новых физиотерапевтических методик, аппаратов и модификации существующих технических средств.

**Цель исследования** - установление характера зависимости изменения значений ЭП и проницаемости БТ различных типов от параметров переменного электрического тока.

**Объектом** данного научно-практического исследования является измерения параметров биофизических процессов проникновения и

распространения электрического тока в БТ в среде действия различных физических полей.

**Предметом** исследования является повышение точности установки значений параметров сигналов физических полей, которые обеспечивают необходимую величину ЭП и глубину проникновения в конкретном биологическом слое, сосуде, ткани или системе.

**Методы исследования.** Используются методы многомерного статистического анализа, методы практической биометрии (выполнялась статистическая обработка полученных результатов измерения) и методы математического моделирования, а именно методы интерполяции и аппроксимации полученных табличных значений, с целью установления аналитической зависимости между значениями ЭП и проницаемости БТ и значениями частот воздействующего электрического тока. [2]

Кровь, плазма и различные тканевые жидкости – это, по сути, растворы электролитов (например, в плазме крови содержится 0,32% NaCl). Проведенные исследования показали, что сопротивление цитоплазмы, живых клеток и некоторых тканей относительно велико. Это можно объяснить тем, что на электрические параметры клеток влияют свойства их мембран, а свойства ткани обусловлены не только свойствами электролитов, но и другими веществами, которые входят в состав ткани: жирами, углеводами, другими органическими веществами со свойствами диэлектриков и полупроводников. По этой причине значения ЭП различных тканей существенно отличается. Лучше проводят ток спинномозговая жидкость, кровь, лимфа, несколько хуже - мышцы, печень, сердечная мышца, легочная ткань и существенно хуже жировая, костная ткани и кожа. Сложными являются электрические свойства клеток. Удельное сопротивление цитоплазмы лежит в пределах от 0,1 до 300 Ом·м (для большинства клеток млекопитающих, примерно, 1-3 Ом·м). Клеточная мембрана - это диэлектрик, удельное сопротивление 1 см<sup>2</sup> которого для разных клеток находится в пределах от 10<sup>3</sup> до 10<sup>4</sup> Ом·м.

Общая структурная схема экспериментальной установки (ЭУ) представлена на рис.1.

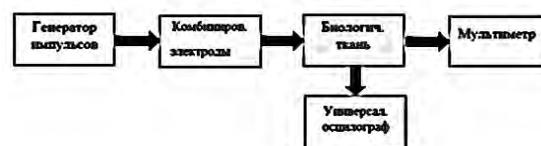


Рис. 1. Структурная схема ЭУ

В процессе работы исследовались и измерялись электрические свойства тканей животного происхождения (мышечная ткань и ткань живого дождевого червя). Сопоставлен график дисперсии электропроводимости для биологических тканей различных типов представлены на рис.2.

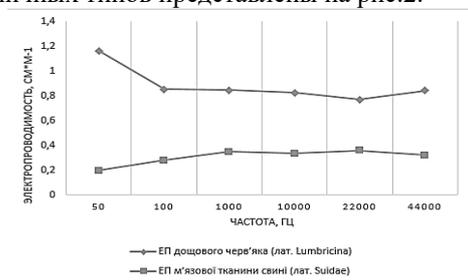


Рис.2 Дисперсия электропроводимости биологических тканей

Новыми результатами в данной работе - является установленные зависимости изменения значений электропроводимости БТ различных типов, от частоты тока, с использованием частотного диапазона 50-44000 Гц (в том числе, исследования с использованием частот терапевтических интенсивностей (22 и 44 кГц) в шести равно удаленных частотных точках). В результате эксперимента установлено - максимальная электропроводимость для живой БТ достигается при частоте воздействия 50 Гц и составляет  $1,163 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ . Сравнительные результаты описаны в работах других авторов и полученные в данном исследовании для неживой БТ (мышечной ткани свиньи (лат. Suidae)), можно сделать вывод, что для частот в диапазоне от 1 до 44 кГц достигаются значения электропроводности, принадлежащие интервалу  $0,32-0,36 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Перспективным направлением для диагностики и медико-биологических исследований проницаемости биологической ткани является измерение зависимости глубины проникновения фармакологических препаратов (ФП) в биоткань от частоты и времени воздействия при импульсном электрофорезе. В основу исследований положена задача создания измерительной системы и алгоритма нахождения наиболее оптимальных параметров электрического сигнала, для обеспечения необходимой глубины и скорости проникновения ФП в БТ, а, следовательно, обеспечения

наибольшего лечебного эффекта. В процессе выполнения данного исследования проведен ряд экспериментов на БТ (жировой) с использованием различных ФП (например, растворы йода и бриллиантовой зелени  $\text{C}_{27}\text{H}_{34}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$ ). На рис. 3 приведена диаграмма зависимости глубины проникновения бриллиантовой зелени ( $\text{C}_{27}\text{H}_{34}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$ ) от частоты тока (время воздействия 60 с.)

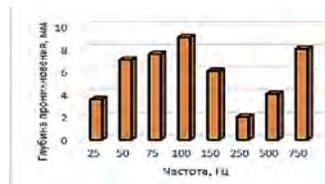


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения бриллиантовой зелени от частоты тока

Из приведенной выше диаграммы, можно сделать вывод, что в электрически активном состоянии наибольшая глубина проникновения для раствора бриллиантовой зелени 1% ( $\text{C}_{27}\text{H}_{34}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$ ) достигается в диапазонах 75-125 Гц (макс.9 мм) и 500-750 Гц (не более 8 мм) при времени воздействия 60 с.

Таким образом, данные исследования актуальны в современной приборной биоинженерии и использованы при разработке нового комбинированного физиотерапевтического излучателя [3].

1. Терещенко Н. Ф. Исследование электропроводимости биологических тканей / Н. Ф. Терещенко, В. В. Цапенко, Н.В. Чухраев // Вестник НТУУ «КПИ» серия Приборостроение - 2017- Вып. 53 (1) / 2017 - С.87-94, Украина, Киев.
2. Цапенко В. В., Исследование зависимости глубины проникновения препаратов в биологическую ткань от частоты и времени воздействия при импульсном электрофорезе / В.В. Цапенко, Н. Ф. Терещенко, Н. В. Чухраев. // Интернаука. – 2017. – №4 (26). – Т. 1. – С. 60–66, Украина, Киев Режим доступа: <http://www.inter-nauka.com/issues/2017/4/2345>.
3. Цапенко В.В. Комплексный излучатель ультратерапии/ В.В. Цапенко, Н.Ф. Терещенко, Н.В. Чухраев //Приборостроение: Материалы 8-й международной научно-технической конференции, Минск, 25-27 ноября 2015 г.: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет; ред. кол.: ОК Гусев [и др.]. – Минск, 2015. – Т.1. – С. 158–159.

УДК 628.74

### ГАЗОДИНАМИКА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Голубев А.А., Невдах В.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

При проектировании систем противопожарной автоматики для различных помещений обоснование выбора типа пожарных извещателей

и их расположения в настоящее время обычно осуществляется на основе компьютерного моделирования динамики начальной стадии пожаров.

При возникновении возгорания, из-за локального повышения температуры воздуха в помещении начинают протекать газодинамические процессы, приводящие к формированию пространственных распределений опасных факторов пожара (ОФП) [1]. Газодинамика в помещении на начальной стадии пожара сильно зависит от его мощности, геометрии помещения, высоты расположения источника возгорания, наличия вентиляционных отверстий, их размеров и расположения.

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование поведения ОФП на их начальном этапе с источником на разной высоте в закрытой комнате и в комнате с естественной вентиляцией через отверстия, расположенные также на разной высоте. Моделирование пожара осуществлялось с помощью программы FDS, в которой реализована полевая модель пожара [2, 3].

При помощи графического интерфейса Pyrosim в прямоугольной расчётной сетке с кубическими ячейками размером 0.1x0.1x0.1 м была создана модель помещения - комнаты с размерами 5.0x3.0x2.7 м (см. рисунок (1)). Потолок и стены комнаты толщиной 0.3 м выполнены из материала с теплофизическими параметрами, соответствующих параметрам пеноблоков. Пол выполнен из материала со свойствами дерева. В комнате имеются два окна, дверь и мебель.

Моделировалась первые 300 секунд квазистационарного по массовой скорости горения пламенного пожара. Результаты моделирования отображались программой визуализации Smokeview и представлялись в виде таблиц с численными значениями контролируемых параметров пожара – полного тепловыделения, температуры и изменения давления воздуха на разных высотах в центре комнаты. Примеры картин пожаров на 195-й секунде в закрытой комнате с источником мощностью 90 кВт, расположенным на полу и на высоте 2.2 м, показаны на рисунках 2(а, б) соответственно. Динамика тепловыделения этих пожаров представлена на рисунке 3. Из этого рисунка видно, что пожар с источником на полу в течение всего времени моделирования является квазистационарным по тепловыделению. Наблюдающиеся небольшие колебания тепловыделения обусловлены неустойчивостью факела пламени над источником пожара. Газодинамика в комнате спокойная. Температура воздуха в центре комнаты нарастает с уменьшающейся скоростью и формируется практически постоянный вертикальный градиент температуры (рисунок 4 а).

Пожар с источником на высоте 2.2 м является квазистационарным по тепловыделению до ~ 120 с. Пламенное горение в этот период времени происходит только над источником. В комнате формируется припотолочный слой дыма, температура которого заметно превышает температуру нижележащих слоев (рисунок 4 б) и выше, чем в случае

пожара с источником на полу. После этого момента начинается пожар с нестационарным тепловыделением - интенсивность пламенного горения в области источника уменьшается, но создаются условия для самовоспламенения в слое дыма, которое может возникать в его разных местах и усилить газодинамические явления в комнате. При этом полное тепловыделение источника и областей самовоспламенения может как значительно превышать квазистационарный уровень, так и быть значительно меньше (см. рисунок 2), а температура воздуха в верхней зоне комнаты при этом испытывает заметные колебания (рисунок 4 б).

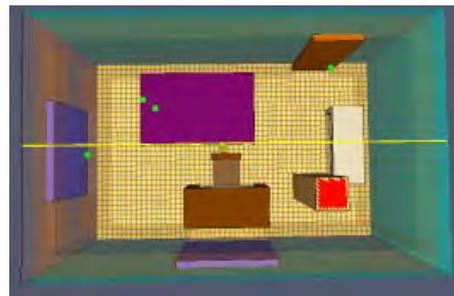
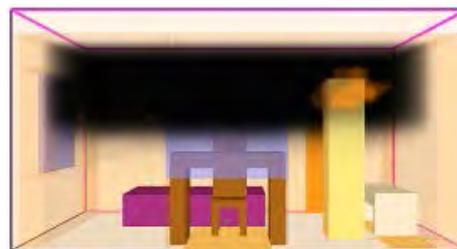


Рисунок 1 – Модель комнаты



а



б

Рисунок 2 – Вид комнаты на 195-й секунде пожара с источником мощностью 90 кВт на полу (а) и высоте 2.2 м (б)

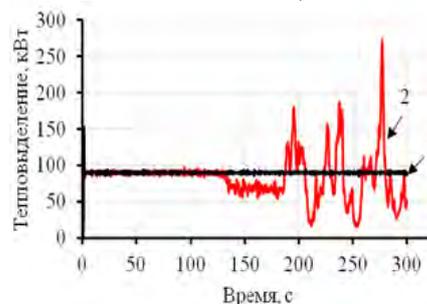


Рисунок 3 – Зависимости тепловыделения от времени при пожаре мощностью 90 кВт в закрытой комнате с источником на полу (1), на высоте 2.2 м (2)

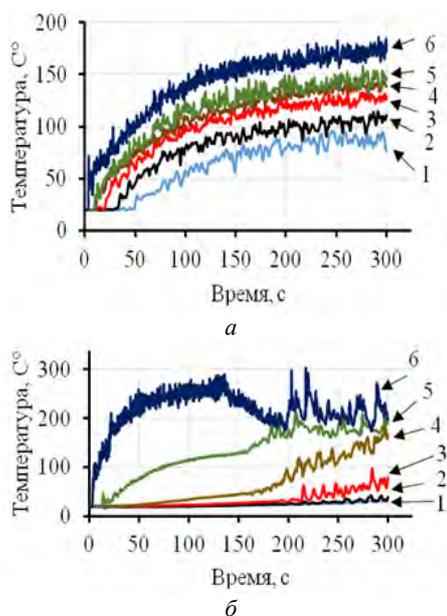


Рисунок 4 – Зависимости температуры воздуха от времени в центре закрытой комнаты на высоте 0.1 м (1), 0,5м (2), 1,0 м (3), 1,5 м (4), 2,0 м (5), 2,6 м (6) при пожаре с источником на полу (а) и высоте 2,2 м (б)

Динамика изменения давления воздуха в центре комнаты при пожаре с источником на полу и на высоте 2.2 м представлена на рисунке 5. Различие в изменениях давлений для двух пожаров объясняется тем, что при расположении источника на высоте нагревается меньший слой воздуха. Его расширение приводит к меньшему изменению давления воздуха в комнате.

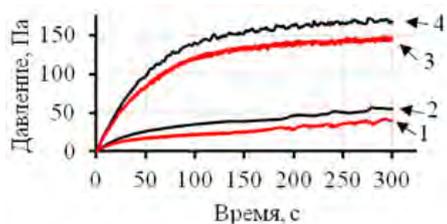


Рисунок 5 – Зависимости изменения давления воздуха в центре закрытой комнаты от времени на высоте 0.1 м (2, 4) и 2.6 м (1, 3) при пожаре с источником на полу (3, 4) и на высоте 2.2 м (1, 2)

Различие давлений воздуха под потолком и у пола - газодинамический эффект, обусловленный работой источника пожара. Пока работает источник пожара в закрытой комнате, нагреваемый в области пламенного горения воздух выталкивается вверх, создавая избыточное давление, причем над полом оно всегда меньше, чем под потолком.

Газодинамика в комнате принципиально меняется, если пожар в комнате происходит при наличии естественной вентиляции. Было проведено моделирование пожаров мощностью также 90 кВт с источником на высоте 2,2 м и с вентиляционным отверстием размерами 0,9х0,3 м от уровня пола под дверью и над дверью под потолком, результаты которого представлены на рисунках 6–8.

Из сравнения рисунков 6 и 3 видно, что динамика тепловыделения при пожаре в комнате с вентиляцией у пола качественно такая же, как и в случае соответствующего пожара в закрытой комнате. Динамики пространственного распределения температуры воздуха таких пожаров также подобны, особенно на участках квазистационарного тепловыделения (см. рисунки 7 а и 4 б). Из сравнения этих рисунков также видно, что на участках пожаров с нестационарным тепловыделением, вертикальный градиент и пространственная неоднородность распределения температуры воздуха при пожаре в закрытой комнате выше, чем при пожаре в комнате с вентиляцией.

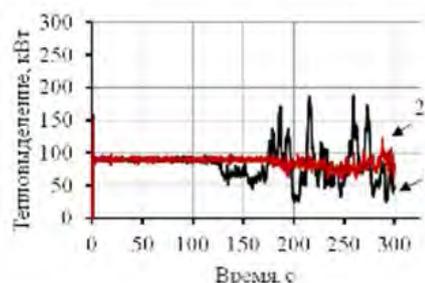


Рисунок 6 – Зависимости тепловыделения от времени при пожаре с источником мощностью 90 кВт на высоте 2,2 м с вентиляционным отверстием от уровня пола (1) и потолка (2)

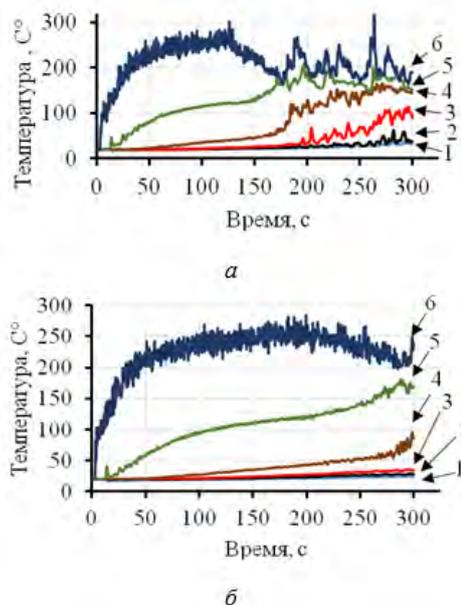


Рисунок 7 – Зависимости температуры воздуха в центре комнаты с вентиляционным отверстием от уровня пола (а), потолка (б) от времени на высоте 0,1 м (1), 0,5 м (2), 1,0 м (3), 1,5 м (4), 2,0 м (5), 2,6 м (6) при пожаре с источником на высоте 2,2 м

Пожар в комнате с источником на высоте 2.2 м и с вентиляционным отверстием под потолком по тепловыделению подобен пожару с источником на полу в закрытой комнате. В то же время динамики пространственного распределения температур существенно различны (см. рисунки 7, б и 4, а).

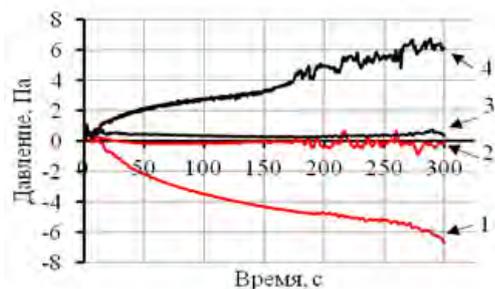


Рисунок 8 – Зависимости изменения давления воздуха в центре комнаты от времени на высоте 0,1 (1, 3) и 2,6 м (2, 4) с вентиляционным отверстием от уровня пола (1, 2), потолка (3, 4)

Отмеченные подобия характеристик пожаров в закрытой комнате и в комнате с естественной вентиляцией обусловлены действием эффекта дымовой трубы, возникающего при пожаре в комнате с вентиляцией. Благодаря этому эффекту, в верхней зоне комнаты формируется область повышенного давления воздуха, из которой нагретый дым выталкивается через верхнюю часть вентиляционного отверстия, а в нижней зоне комнаты образуется область пониженного давления, в которую через

нижнюю часть отверстия поступает свежий воздух (рисунок 8). Положение нейтральной поверхности, разделяющей две этих зоны, зависит от высоты расположения вентиляционного отверстия и мощности источника пожара.

Таким образом, проведенное моделирование показало, что увеличение высоты расположения источника пожара в помещении и появление в нём естественной вентиляции обуславливают появления нестационарных по тепловыделению участков на начальном этапе стационарного по массовой скорости сгорания топлива пожара, а также формируют газодинамические процессы, приводящие к неоднородным вертикальным пространственным распределениям температур и изменения давления воздуха в комнате.

1. Drysdale D. An Introduction for Fire Dynamics. – Third edition. Wiley, 2011. - 551p.
2. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. –Gaithersburg, MA, 2009. – 94 p.
3. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide, NIST Special Publication 1019-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2009. – 176 p.

УДК 628.74

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ В ПОМЕЩЕНИИ

Герасимович В.А., Невдах В.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В последнее время тенденция развития методов и приборов противопожарной защиты объектов разного назначения в наиболее развитых странах заключается в возрастании роли компьютерного моделирования пожаров на таких объектах для прогнозирования динамики опасных факторов пожара (ОФП). Это позволяет использовать гибкое или объектно-ориентированное нормирование в области пожарной безопасности для обеспечения пожарной безопасности объектов с учетом их индивидуальных особенностей. К настоящему времени разработаны и используются различные модели пожаров - зонные, интегральные, полевые, среди которых наиболее универсальными являются полевые (дифференциальные) модели пожара [1]. В полевых моделях задается расчетная область трехмерного пространства, в которой будет протекать моделируемый пожар и в которой требуется знание полей ОФП. Эта область делится на большое количество контрольных объемов – ячеек расчетной сетки. Каждая ячейка рассматривается как точка пространства, в которой численными методами решается система уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии компонентов горючей смеси,

а также описывающих появление и перенос теплового излучения. Полевой метод не содержит никаких упрощающих предположений о структуре газодинамических потоков в расчетном пространстве, и поэтому принципиально применим для рассмотрения любого сценарий развития пожара на объекте практически любой геометрической формы.

В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования режимов горения при пожарах в помещении с помощью программы FDS (Fire Dynamics Simulator), в которой реализована полевая модель пожара [2, 3].

В редакторе-интерфейсе PyroSim была создана модель помещения – комнаты с размерами 4,2х3,3х2,7 м в прямоугольной расчетной сетке с кубическими ячейками размером 0,1х0,1х0,1 м (см. рисунок 1). Моделировались начальные этапы (первые 300 секунд) стационарных по массовой скорости сгорания топлива пожаров (см. рисунок 2) с источником, расположенным на разной высоте, в закрытой комнате и в комнате с естественной вентиляцией через открытую вертикальную фрамугу окна с размерами 0,3х1 м. В качестве источника пожара использовалась поверхность с размерами 0,5х0,5 м и тепловыделением 150 кВт.



Рисунок 1 – Модель комнаты

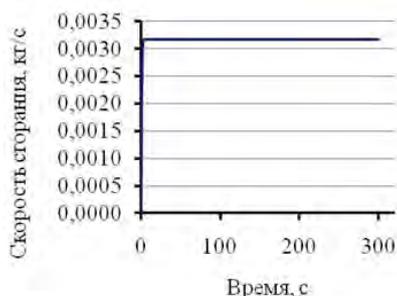


Рисунок 2 – Зависимость массовой скорости сгорания топлива от времени в источнике пожара мощностью 150 кВт

Динамика тепловыделения пожаров в закрытой комнате с источником на полу, высоте 0,7 и 1,7 м представлена на рисунке 3. Из этого рисунка видно, что пожар с источником на полу до ~ 190-й секунды является квазистационарным по тепловыделению. Ему соответствует режим горения, контролируемый горючим материалом, а пламенное горение происходит только в области источника. После этого момента начинается режим горения, контролируемый кислородом. Слой дыма опускается до пола, количество кислорода уменьшается и уже не в состоянии поддерживать пламенное горение источника с заданным уровнем тепловыделения. Тепловыделение пожара начинает уменьшаться, пламенное горение возникает в ближайших к источнику областях дыма и к ~ 220-й секунде полностью прекращается (см. рисунок 6, а).

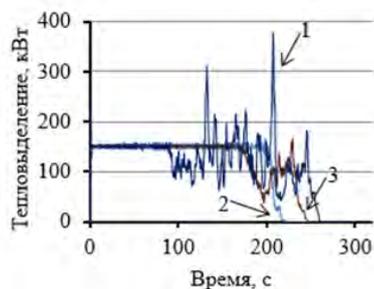


Рисунок 3 – Зависимости тепловыделения от времени при пожаре мощностью 150 кВт с источником на полу (2), на высоте 0,7 м (3) и 1,7 м (1) в закрытой комнате

При пожаре с источником на высоте 0,7 м общая продолжительность пламенного горения увеличивается до ~ 250 секунд, причем

длительность режима горения, контролируемого горючим материалом, уменьшается до ~ 170 секунд. Длительность режима горения, контролируемого кислородом, увеличивается до ~ 80 секунд. В различных областях слоя дыма вокруг источника хаотически происходит его самовоспламенение (см. рисунок 8, б), и тепловыделение становится нестационарным. Самовоспламенение дыма, возникающее хаотически вокруг источника, обеспечивает нерегулярные пульсации на зависимости тепловыделения от времени.

При увеличении высоты расположения источника до 1,7 м продолжительность пламенного пожара возрастает еще больше. Длительность квазистационарного по тепловыделению этапа сокращается до ~ 80 секунд, а длительность нестационарного этапа с горением, контролируемым кислородом увеличивается до ~ 180 секунд (см. кривую 1 на рисунке 2). На этом этапе пожара пламенное горение в области источника практически не происходит. Наблюдается только хаотическое самовоспламенение в разных областях дыма (рисунок 6, в). Амплитуды нерегулярных пульсаций на зависимости тепловыделения от времени сильно возрастают.

Динамика температуры воздуха в центре закрытой комнаты на высотах 0,1 и 1,7 м для описанных пожаров представлена на рисунке 4. Видно, что при увеличении высоты расположения источника пожара увеличивается вертикальный градиент температуры воздуха на квазистационарном по тепловыделению этапе пожара. Так как при этом нагревается меньший слой дыма, то, при одинаковом тепловыделении источника, он нагревается до больших температур, и в его отдельных областях создаются условия для самовоспламенения. Самовоспламенение дыма усиливает газодинамические процессы в помещении и на температурных зависимостях появляются интенсивные нерегулярные пульсации. После прекращения пламенного горения температура воздуха в помещении уменьшается.

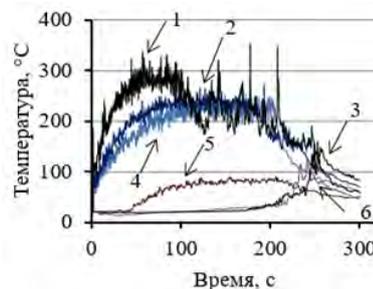


Рисунок 4 – Зависимости температуры воздуха от времени в центре закрытой комнаты на высоте 0,1 (3, 5, 6) и 2,4 м (1, 2, 4) при пожаре с источником на полу (4,5), на высоте 0,7 (2, 6) и 1,7 м (1, 3)

В помещении с естественной вентиляцией все промоделированные пожары – с источником на

полу, высотах 0,7 и 1,7 м имеют подобные квазистационарные динамики тепловыделения (рисунок 5). Выбранные параметры источника пожара, размеры и положение вентиляционного отверстия обеспечивают реализацию режима горения, контролируемого горючим материалом, в течение всех 300 секунд моделирования.

Пожары создают условия для действия эффекта дымовой трубы, обеспечивающего поступление в комнату свежего воздуха через нижнюю часть вентиляционного отверстия, и выход наружу дыма и нагретого воздуха через верхнюю часть отверстия. Различия в картинах пламенных пожаров в закрытой комнате и в комнате с естественной вентиляцией видны из рисунков 6 (а–е).

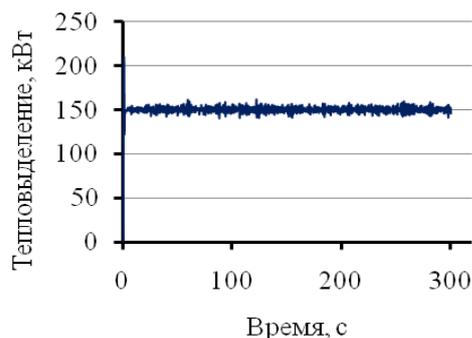


Рисунок 5 – Зависимость тепловыделения от времени при пожаре с источником на высоте 1,7 м в комнате с вентиляцией

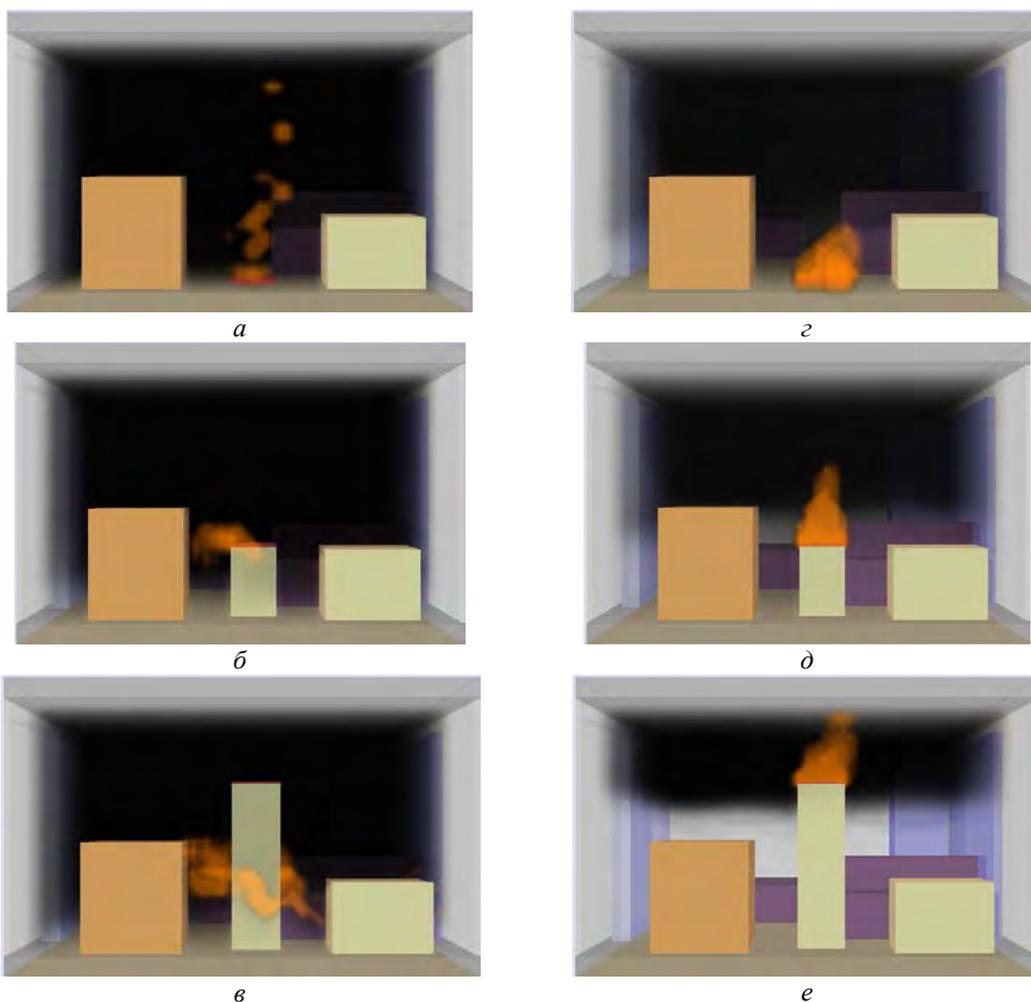


Рисунок 6 – Картины на 200-й секунде пожаров в закрытой комнате (а, б, в) и в комнате с естественной вентиляцией (г, д, е) с источником мощностью 150 кВт на полу (а, г), на высоте 0,7 (б, д) и 1,7 м (в, е)

Таким образом, моделирование пожаров в помещении показало, что увеличение высоты расположения источника пожара в закрытом помещении сокращает квазистационарный по тепловыделению этап пожара, контролируемый горючим материалом, и переводит его в нестационарный пожар, контролируемый кислородом, с

самовоспламенениями в слое дыма. При пожаре в помещении с естественной вентиляцией длительность квазистационарного по тепловыделению этапа пожара, контролируемого горючим материалом увеличивается.

1. Drysdale D. An Introduction for Fire Dynamics. Third edition. Wiley, 2011. - 551p.
2. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. –Gaithersburg, MA, 2009. – 94 p.
3. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide, NIST Special Publication 1019-5 / K. McGrattan [et al.]. Gaithersburg, MA, 2009. – 176 p.

УДК 614.841.34

## РАЗРАБОТКА ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ ПО ЕВРОПЕЙСКИМ НОРМАМ

Черневич О.В., Пастушенко Е.В., Тарасова Н.С.

Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

Внедрение в Республике Беларусь норм и стандартов Европейского союза в области строительства предполагает применение соответствующих систем измерения и регистрации параметров. При проведении испытаний строительных конструкций на огнестойкость по европейским нормам используют термопреобразователи, которые конструктивно отличаются от термопреобразователей, применяемых в соответствии с ГОСТ 30247.1 [1], ГОСТ 30247.2 [2]. Для проведения испытаний в соответствии с требованиями стандартов Европейского Союза сотрудниками института, совместно НП ООО «Энергоприбор» разработаны и внедрены в производство термопреобразователи применяемые при испытаниях на огнестойкость согласно EN 1363-1, EN 1363-2.

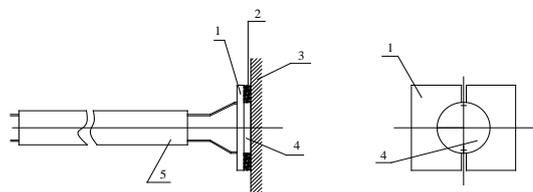
В результате проведения НИОКР разработана конструкторская и эксплуатационная документация на опытные образцы термопреобразователей ТХА(К)-101 для определения температуры образца и ТХА(К)-102 температуры в печи [3].

Преобразователь термоэлектрический ТХА(К)-101 предназначен для измерения температуры газообразных, жидких и твердых сред, не разрушающих защитную арматуру, и может применяться в различных отраслях промышленного и сельскохозяйственного производства, в науке.

Разработанное устройство для измерения температуры представлено на рисунке 1. К поверхности объекта плотно прижимают теплоприемник (медный диск) 4 при помощи элемента для прижатия теплоприемника 1. Между элементом для прижатия теплоприемника 1 и поверхностью объекта применяют связующие (высокотемпературные клей, различные пасты и мастики) 2. Холодные концы термопары 5 подсоединяются к измерительному прибору. При нагревании теплоприемник (медный диск) 4, имеющий практически температуру поверхности объекта, передает термо ЭДС от холодных концов к измерительному прибору [4].

Теплоприемник для измерения температуры в диапазоне (-40 – 400) °С выполнен из меди, элемент для прижатия теплоприемника к

поверхности контролируемого объекта выполнен из паранита и крепится к поверхности контролируемого объекта связующим (высокотемпературные клей, различные пасты и мастики).



- 1 – пластина для прижатия теплоприемника;  
2 – связующее; 3 – контролируемый объект;  
4 – теплоприемник; 5 – холодные концы термопары

Рисунок 1 – Термопара для измерения температуры образца

Защитная арматура выполнена из кремнеземной нити.

- Технические характеристики ТХА(К)–101:  
– рабочий диапазон измеряемых температур – от –40 до + 400 °С;  
– класс по СТБ ГОСТ Р 8.585 – 2;  
– показатель тепловой инерции не более 0,8 с;  
– масса – не более 0,12 кг;  
– рабочая температура кремнеземной оплетки 300 °С.

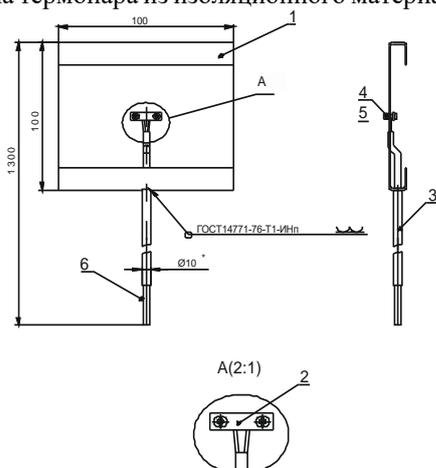
Разработаны технические условия ТУ ВУ 1011114857.072–2010 «Преобразователи термоэлектрические ТХА(К)–101».

Эксплуатация предложенного устройства для измерения температуры является стандартной. Однако за счет возможности простой установки термопары на требуемой поверхности и обеспечения требуемой точности измерений за счет плотного контакта с поверхностью образца сложность крепления уменьшается, а точность измерений увеличивается.

Для измерения температуры в печи при проведении испытаний строительных конструкций на огнестойкость по EN 1363–1, EN 1364–1, EN 1365–1, EN 1363–2, EN 1364–3, EN 1364–4, ГОСТ EN 1363–1 разработан термопреобразователь термоэлектрический ТХА(К)–102 (рис. 2).

Термоэлектрический преобразователь для измерения температуры в печи состоит из

изогнутой стальной пластины, трубы, в которую ставлена термопара из изоляционного материала.



1 – скоба; 2 – пластина; 3 – труба; 4 – винт;  
5 – гайка; 6 – провод термопарный

Рисунок 2 – Термопара для измерения температуры в печи

Изогнутая стальная пластина и труба выполнены из никелевого сплава с размерами (мм):  $(150 \pm 1) \times (100 \pm 0,1) \times (0,7 \pm 0,1)$ .

Измерительное соединение состоит из провода термопары (тип К), находящегося в минеральной изоляции и термостойкой из стального сплава оплетке номинальным диаметром 1 мм. Горячий спай термопары фиксируется к геометрическому центру пластины небольшой стальной полосой, изготовленной из того же материала, что и пластина. Стальная полоса может быть приварена к пластине или прикручена к ней для облегчения замены термопары. Полоса имеет размеры  $18 \times 6$  мм, если она точно приваривается к пластине и  $26 \times 6$  мм, если прикручивается. Болт – 2 мм в диаметре.

Сборка пластины и термопары оснащена прокладкой из неорганического изоляционного материала размером  $(97 \pm 1)$  мм и толщиной  $(10 \pm 1)$  мм, плотность  $(280 \pm 30)$  кг/м<sup>3</sup>.

Технические характеристики ТХА(К)-102:

- рабочий диапазон измеряемых температур – от 20 до + 1200 °С;
- класс по СТБ ГОСТ Р 8.585 – 2;
- показатель тепловой инерции не более 5,0 с;
- масса – не более 2,0 кг;
- рабочая температура кремнеземной оплетки 300 °С.

УДК 621.317.799:621.382

## КОММУТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Лисенков Б.Н., Грицев Н.В.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Республика Беларусь

В автоматизированных системах тестирования полупроводниковых приборов (ПП) испытательные сигналы на объект подвергаемый

Отклонение значений температуры, измеряемой термопреобразователями ТХА(К)-101 от показаний эталонных средств измерений как калибратор температуры поверхностный КТП 500 и устройство термостатирующее измерительное «Термостат-А» приведены в таблице

Результаты измерений температуры

Показатели	ТХА(К)-101		
	№1643	№1639	№1636
КТП-500 при T = 200 °С			
Отклонение от эталонного, °С	17,62	17,80	17,64
Погрешность, %	8,81	8,90	8,82
Термостат АЗ при T = 200 °С			
Отклонение от эталонного, °С	- 1,38	- 1,42	- 1,35
Погрешность, %	0,69	0,71	0,68

Производство разработанных термопреобразователей организовано в НПООО «Энергоприбор».

Внедрение разработанных термопреобразователей повысит точность и достоверность результатов измерений температуры испытываемого образца и температуры в печи при испытании строительных конструкций в соответствии с EN 1363-1. Результаты испытаний строительных конструкций на огнестойкость, будут признаваться в странах Европы, что позволит производителям Республики Беларусь экспортировать продукцию и уменьшить затраты на ее сертификацию.

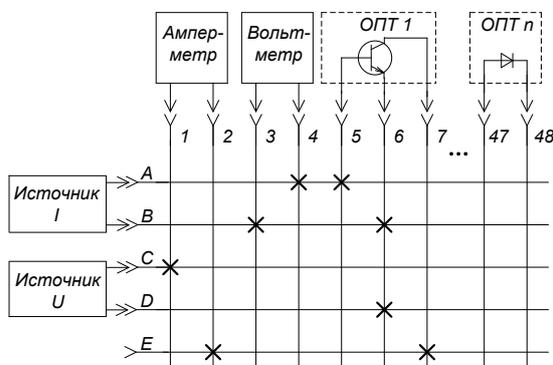
1. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции : ГОСТ 30247.1-94. – Введ. 01.01.96. – М.: МНТКС, 1994. – 11 с.
2. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Двери и ворота : ГОСТ 30247.2-97. Введ. 01.03.1997. – М.: МНТКС, 1997. – 17 с.
3. Разработать термопреобразователи для испытания строительных конструкций на огнестойкость по европейским нормам. Создать базу для проверки термопреобразователей / О.В. Черневич [и др.] ; НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси. – Минск, 2014. – 76 с. – Деп. в ГУ «БелИСА» 13.03.2015. – № 201506.
4. Устройство для измерения температуры : пат. 9685 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 K 7/00, G 01 K 13/00 / О.В. Черневич, Ю.С. Иванов, А.С. Климович ; заявитель НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций. – № u 20121167 ; заявл. 27.12.2012 ; – опубл. 30.10.2013.

совершенствования традиционных и создания новых методов и средств коммутации.

При тестировании ПП обычно применяют матричные коммутаторы, которые обеспечивают возможность соединения входов и выходов по принципу “любой к любому”, например, для подключения нескольких источников и измерителей к одному из электродов ОПТ.

Матричный коммутатор содержит линии (строки) и колонки (столбцы), на пересечении которых, в узлах матрицы, установлены ключевые элементы. В узлах матрицы может быть от 1 до 3 ключевых элементов в зависимости от требований к параметрам коммутатора.

На рисунке 1 представлена типовая схема тестирования биполярного транзистора (ОПТ1) по схеме “общий эмиттер”, из комплекта ПП (ОПТ1 - ОПТn), с помощью матричного коммутатора, вольтметра, амперметра, источников тока и напряжения.



Х – замкнутые узлы

Рисунок 1 – Типовая схема тестирования, с помощью матричного коммутатора

Этот пример демонстрирует возможности матричного коммутатора по созданию сложных измерительных схем путем замыкания предварительно выбранных узлов матрицы.

Для наглядности, эта же схема представлена на рисунке 2, при этом замкнутые узлы матрицы указаны в системе линий (А, В, С, D) и колонок (1, 2, ..., 48).

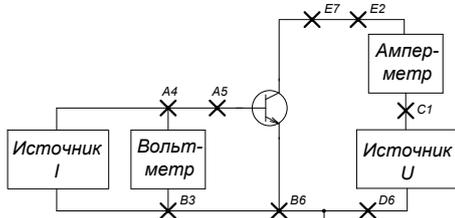


Рисунок 2 – Схема тестирования с помощью матричного коммутатора

Из сравнения рисунков 1 и 2 видно, что достоверность выбора замкнутых узлов матрицы, требует визуализации схемы даже при высокой квалификации персонала.

Выбор замкнутых узлов матрицы упрощается при использовании источников-измерителей (ИИ)

вместо отдельных измерительных приборов. При этом для создания схемы тестирования используется и матричный коммутатор и средства коммутации вида испытательного сигнала, входящие в состав ИИ. То есть, коммутация испытательных сигналов становится двухступенчатой.

На рисунке 3 представлена схема тестирования транзистора ОПТ1 с помощью трех ИИ и матричного коммутатора.

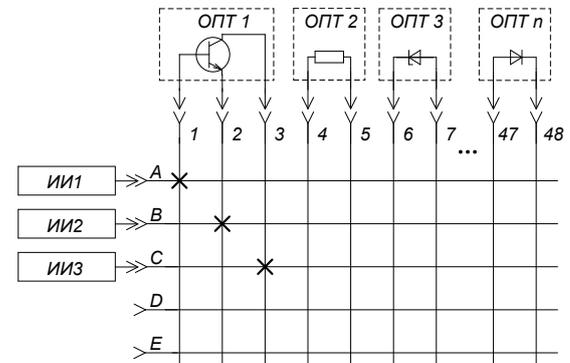


Рисунок 3 – Схема тестирования с помощью матричного коммутатора и трех ИИ

Количество ИИ, необходимое для тестирования ПП, определяется числом электродов объектов тестирования. Например, если в состав тестируемого комплекта входят двух-, и трехполосники, система тестирования должна содержать не менее трех ИИ. При этом, схема включения транзистора (“общий эмиттер”, “общая база” или “общий коллектор”) определяется режимами работы ИИ1-ИИ3.

Для повышения достоверности формирования последовательности тестов в автоматизированном измерительном комплексе (АИК), состоящем из персонального компьютера (ПК), измерителя вольтамперных характеристик (ВАХ) на базе ИИ и матричного коммутатора, разработаны методика и программное обеспечение (ПО) основанные на визуализации измерительной схемы на дисплее ПК.

Методика включает: выбор типа ОПТ, указание портов матричного коммутатора, к которым подключен ОПТ, и установку параметров сигналов на его электродах [1].

К недостаткам матричного коммутатора можно отнести большое количество ключевых элементов, что усложняет его конструкцию и затрудняет достижение высоких параметров, несмотря на большие материальные затраты.

Поэтому для тестирования ПП применяют и более простые типы коммутаторов, в частности мультиплексные коммутаторы.

Например, фирма Keysight (США) выпускает две модификации прецизионного коммутатора E5250A для тестирования ПП. Сложный матричный коммутатор E5252A (до 48 портов) и простой многосекционный мультиплексный коммутатор E5255A (до 96 портов).

На рисунке 4 представлена схема тестирования ОПТ2 с помощью ИИ1 и одной секции мультиплексного коммутатора.

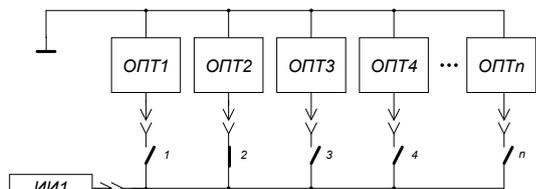


Рисунок 4 – Схема тестирования с помощью мультиплексного коммутатора

Однако, применение мультиплексных коммутаторов ограничено испытаниями однотипных ПП, например, на надежность.

Для тестирования комплекта ПП с высокой точностью и небольшими затратами нами разработан метод коммутации, реализуемый на базе АИК, включающем ПК, измеритель ВАХ и многосекционный мультиплексный коммутатор. Особенность этого метода заключается в том, что электроды ОПТ из комплекта ПП соединяют с портами различных секций коммутатора. Это значит, что новый метод предполагает еще одну (третью) ступень коммутации, от реализации которой зависят метрологические параметры АИК, степень автоматизации и затраты на их обеспечение.

Если соответствие между электродами всех ОПТ тестового модуля и портами коммутатора устанавливаются вручную при подготовке к тестированию, то метод обеспечит автоматический выбор ОПТ только для модулей с идентичной разводкой электродов (распиновкой, цоколевкой). Это сужает его функциональные возможности, по сравнению с применением матричного коммутатора, однако существенно уменьшает финансовые затраты.

В качестве примера применения нового метода коммутации, на рисунке 5 представлена схема тестирования транзистора ОПТ1 с помощью ИИ1-ИИ3, связанных с собирающими

узлами (А, В, С) трех секций мультиплексного коммутатора, по 12 портов в каждой.

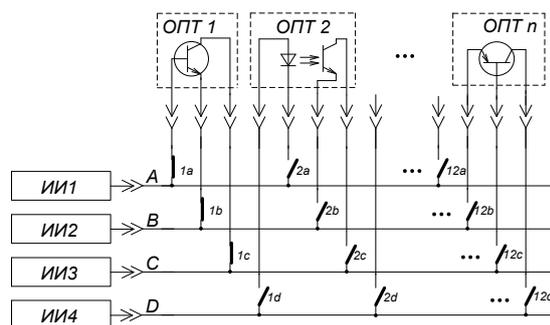


Рисунок 5 – Схема тестирования ОПТ1 при трехступенчатой коммутации

Для тестирования четырехполюсников схема содержит 4 ИИ и 4 секции коммутации, при этом общее число портов составляет  $4 \times 12 = 48$ . Это позволяет тестировать оптроны (рис. 5) или отдельно тестировать полупроводниковые оптические излучатели и фото-приемники [2].

Методика формирования последовательности тестов для АИК с трехступенчатой схемой коммутации, наряду с визуализацией измерительной схемы, должна обеспечить контроль соединения электродов ПП с портами из различных секций мультиплексного коммутатора.

1. Лисенков Б.Н., Грицев Н.В. Методы и средства контроля параметров полупроводниковых изделий в процессе радиационного воздействия // Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции по военно-техническим проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 20–22 мая 2017г.). – Ч 1. – С. 174–181.
2. Лисенков Б.Н., Грицев Н.В. Измерение характеристик полупроводниковых оптических излучателей // Лазерная физика и оптические технологии: материалы IX международной научной конференции, 2012. – Ч. 2. – С. 92–95.

УДК 539.121.6/7.07

## РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЭФФЕКТИВНЫХ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОД ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Борисевич А. Е., Лобко А.С.

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ  
Минск, Беларусь

Ввиду того, что радиоизотопы имеют широкое применение в научных исследованиях, в гамма-дефектоскопии, в радиационных технологиях, в радиобиологических экспериментах, их поступление в биосферу происходит по многим каналам. Ядерная энергетика является основным источником поступления радиоактивных изотопов в окружающую среду. Наибольшую опасность в случае возникновения проектных аварийных ситуаций и

происшествий, представляют долгоживущие изотопы. Так, например, цезий-137 с периодом полураспада 30,2 года, имеет техногенное происхождение и ядерная энергетика является основным источником поступления радиоцезия в биосферу. Далее радиоцезий мигрирует по биологическим цепочкам и проникает в организм человека через желудочно-кишечный тракт или дыхательные пути.

В Институте физико-органической химии НАН Беларуси разработаны и синтезируются волокнистые сорбенты, способные селективно аккумулировать изотопы тяжелых металлов, в том числе и радиоактивных [1]. С момента аварии и при ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима» на мировом рынке резко возрос интерес к таким материалам. Однако, данные сорбенты не исследованы радиометрическими методами систематически, особенно при циркуляции через них водных растворов с различной скоростью прокачки, и при концентрациях радиоизотопа в жидкости от десятков до тысячи Бк/л. Нами разрабатывается радиометрический комплекс прокачного типа, который позволит определять параметры эффективности сорбции различных изотопов гамма-распадчиков, в частности Cs-137 из водных растворов.

Структурная схема комплекса представлена на рис. 1.

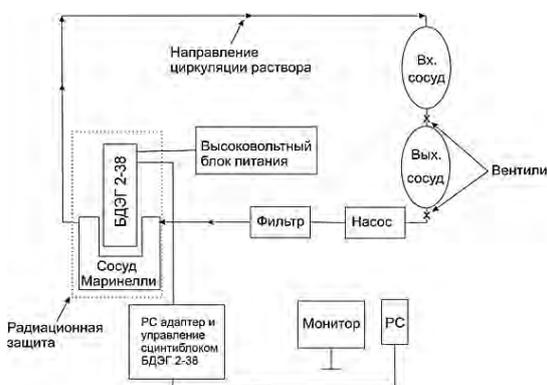


Рис. 1. Структурная схема установки

Для циркуляции жидкости с различными скоростями в контуре, разработана подсистема прокачки с высокой степенью герметичности. Раствор с радиоизотопом прокачивается по контуру насосом перистальтического типа и контактирует только с высокопрочной и химически инертной прокачной трубкой насоса. Другие элементы системы, с которыми механически соприкасается жидкость, так же имеют высокую механическую и химическую стойкость. В системе отсутствуют элементы из стекла. Благодаря тому, что используется перистальтический дозирующий насос с шаговым двигателем, имеется возможность контролировать и плавно изменять скорость протекания жидкости через сорбент от 0 до 150 мл/мин.

Ключевым узлом подсистемы измерения удельной активности радиоизотопов в растворе и, непосредственно самого радиометра, является сцинтилляционный блок БДЭГ 2-38.

Сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) размерами 63х63 мм обеспечивает высокую эффективность регистрации гамма-квантов, что в позволяет измерять низкие удельные активности

материалов – от десятков Бк/кг при наличии радиационной защиты от внешнего радиоактивного фона. Кроме того, в радиометре предусмотрены базовые функции спектрометра рис. 2.

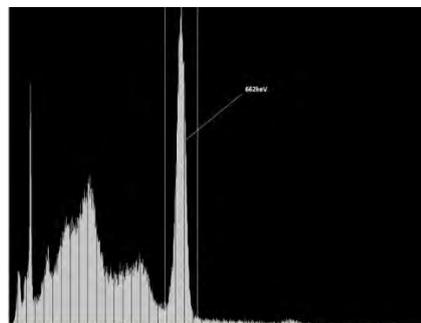


Рис. 2. Спектр Cs-137 с гамма-линией 662 кэВ, энергетическое разрешение для этой линии 6,7 %

Для калибровки и проверки работоспособности спектрометра-радиометра используется лабораторный источник Cs-137 ОСГИ-Р с активностью 9.6 кБк.

Критическим узлом комплекса, который необходимо периодически извлекать из канала прокачки - является исследуемый сорбент. Процедура извлечения естественным образом приводит к разгерметизации прокачного контура. Поэтому, замена фильтрующего узла производится при отсутствии раствора с радиоизотопом в области его размещения. Более того, вся радиоактивная жидкость в этом случае располагается только во входном сосуде см. рис.1. Исследуемые сорбенты корпусируются в серийно выпускаемые медицинские шприцы с объемом 1-2 мл. Это позволяет удобно и оперативно извлекать фильтрующий узел из контура и помещать следующий целиком, т.е. сорбент с корпусом в сборе.

Для измерения фильтрующих свойств материалов, используются жидкости с радиоизотопом на основе питьевой или морской воды в количестве около 1.5 л. Входной, выходной сосуды предусмотрены для первичного размещения растворов и их сбора после фильтрации. Данные емкости имеют объем более 2 л.

Сосуд Маринелли применяется для измерения удельной активности жидкости после фильтрации. Данный компонент обычно является коммерчески доступным. Однако, ввиду повышенных требований к герметичности при небольшом избыточном давлении, специализированный сосуд Маринелли был разработан и изготовлен на опытном производстве рис. 3.

Для обслуживания и управления комплексом используется компьютер с WINDOWS программой, разработанной специально для данного спектрометра-радиометра. В приложении доступны следующие пользовательские функции: управление накоплением спектров, первичная обработка данных, сохранение данных в виде текстовых таблиц с целью последующей обработки во

внешних специализированных приложениях. Программа имеет простой и интуитивно понятный интерфейс.



Рис. 3. Сцинтиляционный блок БДЭГ 2-38 помещенный в прокачиваемый герметизированный сосуд Маринелли (слева). БДЭГ 2-38 изображен справа

Нами разработана методика определения эффективности сорбции материала при различных скоростях прокачки жидкости с радиоизотопом при использовании на примере Cs-137. Методика основана на относительном измерении удельной известной активности раствора до

фильтрации и после нее. Так как удельная активность жидкости до фильтрации известна и геометрия система не изменяется, то удельная активность раствора после фильтрации вычисляется, при заранее установленной величине фона [2]. Как правило, проводится измерение удельных активностей, когда скорость фонового счета на несколько порядков ниже скорости полезного счета. Так же, при вычислениях учитываются отсчеты лежащие в определенных энергетических воротах, соответствующих гамма- линии радиоизотопа. Такая энергетическая дискриминация позволяет пренебрегать фоновыми отсчетами в подавляющем большинстве измерений. Учет фона и размещение свинцовой защиты для зоны детектирования производится в диапазоне удельных активностей 10-100 Бк/л.

1. Лаборатория синтеза и исследования свойств ионообменных волокон. Электронный ресурс: <http://ifoch.bas-net.by/structure/laboratory-of-syntheses-and-investigation-of-ion-exchange-fibers.html>.
2. Дементьев, В.А. Измерение малых активностей радиоактивных препаратов. – Москва: Атомиздат, 1967. – 140 с.

УДК 004.056.55

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ПЕРИМЕТРОМ

Медведев Н.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация*

**Введение.** Актуальность проблемы несанкционированного доступа (НСД) возрастает пропорционально количеству информации, которая хранится и обрабатывается с помощью информационных систем (ИС). С ростом потоков информации увеличивается и количество пользователей ИС, и как следствие, возрастают риски доступа к данным лиц, не имеющих на то права. Программные продукты, автоматизирующие процесс оценивания риска, не в полной мере позволяют достоверно оценить уровень риска конкретного объекта для обеспечения его информационной безопасности (ИБ). Это связано с определением в них значений вероятностей угроз экспертным путем на основании статистических данных об инцидентах в области ИБ, с отсутствием возможности учесть специфику объекта защиты. Задачей настоящей публикации является математическая постановка математической задачи управления рисками несанкционированного доступа к информации для ее последующего строгого решения.

**Обзор критериев анализа рисков и показателей.** Под *риском* понимается ситуация, когда

внешняя или внутренняя угроза использует уязвимости системы для нарушения её функционирования или совершения иных вредоносных действий. Анализ рисков производится исходя из непосредственных целей и задач по защите конкретного вида информации конфиденциального характера. Цель анализа рисков заключается в определении характеристик рисков корпоративной информационной системы и её ресурсов. Результаты анализа рисков используются в рамках мероприятий по экспертизе средств защиты как один из критериев оценки уровня защищённости системы.

При проведении анализа рисков учитываются следующие основные факторы:

- ценность программно-аппаратных и информационных ресурсов системы;
- значимость угроз и уязвимостей;
- эффективность существующих или планируемых средств обеспечения информационной безопасности.

Показатели ресурсов, значимости угроз и уязвимостей, эффективность средств защиты могут быть определены как количественными методами (преимущественно для стоимостных

характеристик), так и качественными (в частности, учитывающими штатные или чрезвычайно опасные нештатные воздействия внешней среды).

В настоящее время теория и практика выработали множество методов для определения величины информационных рисков. Все эти методы можно объединить в две группы:

- 1) качественные методы анализа риска;
- 2) количественные методы анализа риска.

Качественный анализ информационных рисков в инновационной деятельности предприятия позволяет создать структуру рисков. Качественный анализ риска заключается в выявлении источников и причин риска, этапов и работ по проекту, при выполнении которого возникает риск. Он состоит из ряда этапов: определение потенциальных зон риска; выявление рисков; прогнозирование практических выгод и возможных негативных последствий проявления выявленных рисков.

Результаты качественного анализа, в свою очередь, служат исходной базой для проведения количественного анализа.

Выделяют следующие методы качественного анализа рисков:

1. Метод экспертных оценок.
2. Метод рейтинговых оценок.
3. Контрольные списки источников рисков.

В настоящее время известно множество табличных методов оценки информационных рисков компании.

Риск в основном оценивают вероятностной характеристикой (безразмерной величиной от 0 до 1), но могут использовать и частоту реализации риска. Частота реализации - это число случаев возможного проявления опасности за определенный период времени.

**Математическая постановка задачи.** Исходные данные:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} - \text{множество угроз}$$

$$K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\} - \text{множество контрмер}$$

Таблица 1 – Матрица покрытия.

	$u_1$	...	$u_n$
$K_1$	$d_{11}$	...	$d_{1n}$
...	...	...	...
$K_m$	$d_{m1}$	...	$d_{mn}$

Пусть  $C = \{c_1, \dots, c_m\}$  – множество затрат на средства защиты, где  $c_i$  – стоимость  $i$ -го средства защиты. Таким образом, необходимо решить задачу минимизации стоимости набора, при условии закрытия всех угроз:

$$f(k) = \sum_{i=1}^m c_i k_i \rightarrow \min,$$

Условия ограничения к задаче:

$$\sum_{i=1}^m d_{i,j} k_i \geq 1, \forall j \in \{1, \dots, n\},$$

$$d_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{ая контрмера закрывает } j - \text{ую угрозу,} \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$k_i = \begin{cases} 1, & \text{если средство защиты содержится в наборе,} \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

**Решение поставленной задачи.** Возьмем за основу дуэльную ситуацию, пусть имеется множество способов атаки, с помощью которых нарушитель может получить доступ к защищаемой информации (множество актуальных угроз)  $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ , а  $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ , множество мер, применимых для защиты от актуальных угроз.

Пусть  $a'_{i,j}$ ,  $a''_{i,j}$  прогнозируемый и остаточный ущерб до и после применения [6]. Рассмотрим матрицу  $A'$  размера  $m \times n$ , состоящую из элементов вида  $a'_{i,j}(t) = A'(i,j)$ ;  $i = \overline{1, m}$ ;  $j = \overline{1, n}$ ;  $a'_{i,j}$  – ущерб от  $j$ -й угрозы при использовании  $i$ -й контрмеры.

Таблица 2 – Матрица прогнозируемых ущербов.

	$u_1$	...	$u_n$
$k_1$	$a'_{1,1}$	...	$a'_{1n}$
...	...	...	...
$K_m$	$a'_{m,1}$	...	$a'_{mn}$

Таблица 3 – Матрица остаточных ущербов.

	$u_1$	...	$u_n$
$k_1$	$a''_{1,1}$	...	$a''_{1n}$
...	...	...	...
$K_m$	$a''_{m,1}$	...	$a''_{mn}$

Пусть  $a''_{i,j}$  – остаточный ущерб при использовании  $i$ -ой контрмеры для  $j$ -ой угрозы,  $b_i$  – разница между прогнозируемым ущербом до применения меры защиты и остаточным ущербом,  $p_i$  – вероятность реализации угрозы,  $y$  – суммарный остаточный ущерб после применения мер защиты:

$$y_i = \sum_{j=1}^n a''_{i,j}; i = \overline{1, m};$$

$$b_i = \sum_{j=1}^n (a'_{i,j} - a''_{i,j}); i = \overline{1, m}.$$

Следовательно, получаем итоговую функцию

$$F(k) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{c_i + y_i}{b_i} \right) k_i p_i \rightarrow \min.$$

Обеспечив минимум функции  $F(k)$ , мы сумеем добиться минимизации рисков НСД для ИС с защищаемым периметром.

1. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. - М.: Мир, 1979. – 600 с.
2. Медведев Н.В. Исследование процесса функционирования информационных каналов мобильных робототехнических комплексов. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2015. – № 8. – С. 29–36.

3. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах (утверждена 17 февраля 2015 г. заместителем директора ФСТЭК России).
4. Казарин О.В. Особенности анализа рисков утечки конфиденциальной информации по технически каналам при создании радиоэлектронных средств. / О.В. Казарин // Вопросы кибербезопасности Специальная техника. – 2015. – № 4. – С. 62–69.
5. Троицкий И.И., Репин М.М. Организация работы по защите информации на этапе испытаний опытного образца радиоэлектронной техники // Безопасные информационные технологии: сборник трудов Второй всероссийской научно-технической конференции / под ред. Матвеева В.А. – М: Изд-во НИИ радиоэлектроники и лазерной техники, – 2011 – С. 136–138.
6. Феер К. Беспроводная цифровая связь: методы модуляции: пер. с англ. / под. ред. В. И. Журавлёва. – М.: Радио и связь, 2000.
7. Машкина И.В., Рахимов Е.А., Васильев В.И. Методика построения модели комплексной оценки угроз информации, циркулирующей на объекте информатизации / И.В. Машкина, Е.А. Рахимова, В.И. Васильев // Известия ТРТУ. Материалы VIII научно-практической конференции «Информационная безопасность». – Таганрог: ТРТУ, 2006. – С. 70–76.

УДК 621.317.328:621.372.8

### ДАТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВЫХ ВОЛНОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ЖК ЗАПОЛНЕНИЕМ

**Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н.**  
*Университет гражданской защиты МЧС Беларуси*  
 Минск, Республика Беларусь

Современные промышленные технологии сопровождаются побочным возникновением электростатических полей при работе электротехнического оборудования, а также целенаправленной их генерацией для технологических процессов. Систематическое воздействие на организм человека сверхдопустимых уровней электрического поля отрицательно воздействует на здоровье человека, может привести к необратимым изменениям в организме. Определение величины напряженности электростатических полей требуется в нефтяной, химической, текстильной и электронной промышленности (т.е. там, где возникает вероятность появления электрических зарядов, приводящих к взрыву или пожарам), а также в области изучения атмосферного электричества, экологии, медицине и др. В связи с этим приобретают большое значение проблемы, связанные с разработкой новых средств обнаружения и получения информации о параметрах электростатических полей.

Сравнительный анализ показывает, что актуально измерение напряженности электростатического поля в диапазоне от 0,3 до 3000 кВ/м.

В традиционных датчиках электрического поля используются антенны, проводящие электроды или металлические соединения. Наличие металлов в датчиках может приводить к искажениям измеряемых полей. В отличие от них волноводные оптические датчики практически не вызывают возмущение электрического поля, а оптические волокна, соединяющие сенсорное устройство с измерительным блоком, естественным образом устойчивы к электромагнитному воздействию [1].

В данной работе приведена структура, принципы функционирования и измерительный диапазон датчика электрических полей на базе микрокольцевых резонаторов на основе щелевых волноводов с ЖК заполнением.

Мы рассматриваем две структуры микрокольцевого резонатора на основе волноводов с вертикальной и горизонтальной щелью с ЖК заполнением, показанные на рис. 1. Кольцевой микрорезонатор имеет набор резонансных длин волн. Излучение, распространяющееся по входному волноводу на длинах волн, совпадающих с резонансными, поступает в кольцевой волновод. Оставшаяся часть излучения на других длинах волн распространяется дальше, практически не ответвляясь в микрорезонатор. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Таким образом, в выходной волновод поступает излучение узких спектральных диапазонов, центральные длины волн которых соответствуют резонансным длинам волн микрорезонатора. Ширина этих диапазонов задается коэффициентом связи кольцевого и прямых волноводов, а также параметрами самого микрорезонатора.

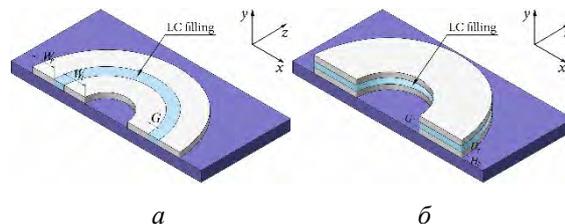


Рисунок 1 – Структуры микрокольцевого резонатора на основе волноводов с вертикальной (а) и горизонтальной (б) щелью с ЖК заполнением

Если щелевой волновод с ЖК заполнением внести во внешнее электрическое поле, показатель преломления ЖК, заполняющего щель, изменится пропорционально величине электрического поля. Это в свою очередь приведет к изменению эффективного показателя преломления щелевого волновода. В результате изменится оптическая длина кольцевого резонатора и сместится его

резонансная длина волны. Это приведет к изменению интенсивности выходного сигнала на несущей длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора. Таким образом, измеряя интенсивность выходного оптического сигнала на выходе резонатора, можно определять напряженность электрического поля, воздействующего на резонатор.

С помощью метода линий [2], модифицированного для исследуемой структуры, мы произвели расчет эффективного показателя преломления и распределение полей мод изогнутых щелевых волноводов с ЖК заполнением.

На рис. 2 представлена зависимость сигнала на выходе резонатора на базе изогнутого волновода с вертикальной щелью с ЖК заполнением с радиусом изгиба 32 мкм от напряженности внешнего электрического поля при различной ширине щели. Наклон кривых, описывающих зависимость выходного сигнала от интенсивности воздействия электрического поля, характеризует чувствительность датчика.

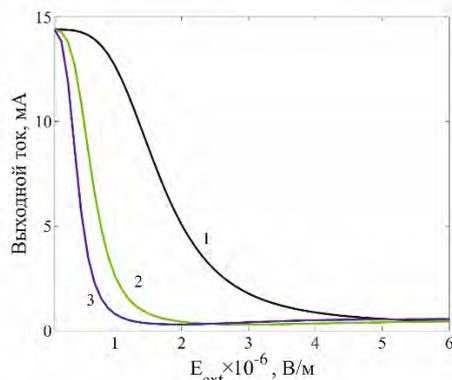


Рисунок 2 – Зависимость сигнала на выходе резонатора на основе волновода с вертикальной щелью с ЖК заполнением от напряженности электрического поля. Радиус изгиба волновода 32 мкм, ширина щели 100 (кривая 1), 200 (2) и 300 (3) нм

Как видно из рисунка, чувствительность микрорезонатора к электрическому полю зависит от ширины щели и, соответственно, от величины ЖК заполнения. Кроме того, чувствительность датчика увеличивается при увеличении радиуса резонатора (его оптической длины). При этом уменьшается диапазон измерения. Датчики на основе вертикальных щелевых волноводов с ЖК заполнением могут быть использованы для измерения внешних электрических полей в пределах от 0 до  $3 \times 10^6$  В/м с точностью до 20 нА/(В/м). Поскольку темновой ток фотоприемника имеет примерно такой же порядок, очевидно, что такой датчик не позволяет отслеживать изменения напряженности внешнего электрического поля в пределах 1 В/м. Таким образом, датчик на основе волновода с вертикальной щелью может быть использован для измерений напряженности электрического поля с точностью до 10 В/м.

На рис. 3 показана зависимость сигнала на выходе кольцевого микрорезонатора на базе волновода с горизонтальной щелью, заполненной ЖК, от напряженности внешнего электрического поля. Как видно из рисунка, датчики на основе горизонтальных щелевых волноводов более чувствительны к электрическому полю, чем вертикальные щелевые волноводы. Возможной причиной этого могут быть большие размеры горизонтальной щели и, следовательно, большее количество заполняющего ее ЖК.

Чувствительность датчика примерно равна 150 нА/(В/м), что позволяет отслеживать изменение интенсивности электрического поля в пределах 1 В/м. Однако диапазон измерений значительно уже (порядка  $10^5$  В/м). При этом диапазон измерений может быть смещен выбором параметров резонатора или несущей длины волны оптического излучения. В качестве примера, начальное значение диапазона измерений на рис. 3 смещено на величину  $2 \times 10^6$  В/м. Таким образом, волноводы с вертикальной щелью можно использовать для грубого определения напряженности электрического поля, а резонаторы с горизонтально-щелевыми волноводами – для более точного ее измерения.

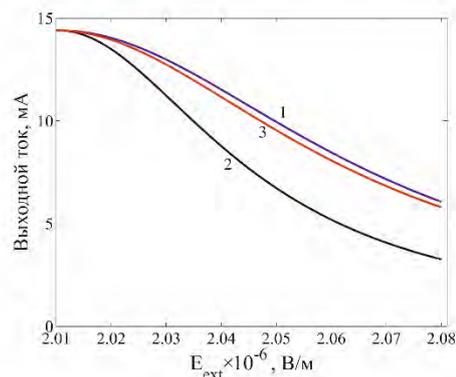


Рисунок 3 – Зависимость сигнала на выходе кольцевого микрорезонатора резонатора на основе волновода с горизонтальной щелью с ЖК заполнением от напряженности электрического поля. Радиус резонатора 32 мкм, высота щели 150 (1), 250 (2) и 400 (3) нм

Таким образом, предложена структура датчика внешних электрических полей на базе кольцевых микрорезонаторов на основе волноводов с горизонтальной и вертикальной щелями, заполненными ЖК. Использование резонансных свойств позволяет значительно повысить чувствительность датчика. Горизонтально-щелевые волноводы более чувствительны к напряженности электрического поля, чем волноводы с вертикальной щелью. Однако они позволяют определять электрические поля в большем диапазоне величин. Таким образом, датчик может быть сконструирован одновременно из резонаторов на базе вертикально- и горизонтально-щелевых волноводов. Волноводы с вертикальной щелью

можно использовать для грубого определения напряженности электрического поля (десятичные разряды), а резонаторы с горизонтально-щелевыми волноводами – для более точного ее измерения (единичные разряды).

1. V.M.N. Passaro, F. Dell'Olio, F. De Leonardis. Electromagnetic field photonic sensors. Progress in Quantum Electronics. 2006. Vol. 30. P.45–73.
2. R. Pregla. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends // J. Lightwave Technol. –1996. – Vol. 14, No 4. – P.634–639.

УДК 621.397

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМА НА ЧЕЛОВЕКА С УЧЕТОМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Гавриленко В.В., Зайцева Е.Г.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Шумом называется всякий неприятный, нежелательный звук или совокупность звуков, мешающих восприятию полезных сигналов и нарушающих тишину, оказывающих вредное или раздражающее воздействие на организм человека, снижающих его работоспособность [1]. В качестве звука человек воспринимает упругие колебания, распространяющиеся в среде, которая может быть твердой, жидкой или газообразной. В зависимости от источника генерирующего колебания, различают шумы механического, аэродинамического, гидродинамического, электромагнитного происхождения. По времени действия шумы подразделяются на: постоянные (уровень звука которых за 8-часовой рабочий день изменяются по времени не более чем на 5 дБ при измерениях на временной характеристике «медленно» шумомера по ГОСТ 17187-71); непостоянные, при изменении уровня звука более 5 дБ. Непостоянные шумы, в свою очередь, делятся на: колеблющиеся по времени (уровень звука которых непрерывно изменяется во времени); прерывистые (уровень звука которых резко падает до уровня фонового шума, с интервалом в 1 с и более); импульсные (состоящие из 1-го или нескольких звуковых сигналов с длительностью более 1 с и уровнем звука более 10 дБ) [2].

Шум в производстве и в быту отрицательно влияет на организм человека, приводит к снижению производительности труда.

Устойчивый постоянный шум оказывает меньшее влияние на организм человека, чем нерегулярно возникающий высокочастотный. Шум способствует быстрому наступлению у человека чувства усталости. Шум с уровнем интенсивности более 60 дБ тормозит нормальную пищеварительную деятельность желудка. При шуме 80-90 дБ число сокращений желудка в минуту уменьшается на 37%. Установлено, что при интенсивности шума более 60 дБ выделение слюны и отделение желудочного сока понижается на 44%. Временное, а иногда и постоянное повышение кровяного давления, повышенная раздражительность, понижение работоспособности, душевная депрессия и т.п. являются следствием действия шума. Неопределенные шумы, не доходящие до сознания, также

вызывают истощение центральной нервной системы, в результате чего они могут служить причиной незаметных до поры нарушений в организме.

У человека, находящегося в течение 6-8 часов под воздействием шума интенсивностью 90 дБ, наступает умеренное понижение слуха, исчезающее примерно через 1 ч после его прекращения. Шум, превышающий 120 дБ, очень быстро вызывает у человека усталость и заметное понижение слуха. В каждом отдельном случае степень потери слуха и длительность периода восстановления пропорциональны уровню интенсивности и длительности воздействия.

При большой интенсивности шум не только влияет на слух, но и оказывает другое воздействие (головная боль, плохая восприимчивость речи), порой чисто психологическое воздействие на человека.

Действуя на центральную нервную систему, шум оказывает влияние на деятельность всего организма человека: ухудшается зрение, деятельность органов дыхания и кровообращения, повышается кровяное давление. Шум ослабляет внимание и затормаживает психологические реакции. По этим причинам шум способствует возникновению несчастных случаев и ведет к снижению производительности труда [3].

Шум, как и звук в целом, возможно оценивать как объективно, так и субъективно.

Для объективной оценки используют давление, поверхностную плотность мощности и соответствующие логарифмические оценки, называемые уровнями шума. Наименьшая сила звука, которая воспринимается слуховым аппаратом человека, называется порогом слышимости данного звука и составляет при частоте колебаний 1000 Гц  $2 \cdot 10^{-5}$  Па или 10 – 12 Вт/м<sup>2</sup> [4].

Для оценки уровня интенсивности используется сравнение измеряемого звука с эталонным звуком частотой в 1000 Гц. Единицей измерения громкости является фон. Если какой-либо звук окажется на слух таким же громким, как звук частотой 1000 Гц и с уровнем силы 1 дБ, то уровень громкости данного звука принимается равным 1 фону. Различие между уровнем силы звука и уровнем громкости заключается в том, что

первый определяет только чистую физическую величину уровня силы звука независимо от частоты, а второй учитывает также и физиологическое, субъективное ощущение звука.

Длительное воздействие шума ухудшает состояние человека. Поэтому, кроме уровня шума, имеет смысл учитывать и длительность его воздействия. Поэтому целесообразно проанализировать возможность использования в качестве критерия шумового воздействия экспозицию шума (шумэкспозицию) - произведение поверхностной плотности мощности шума в Вт/м<sup>2</sup> на время воздействия шума в секундах. В этом случае шумэкспозиция может рассматриваться как поверхностная плотность энергии шумовая энергия в Дж/м<sup>2</sup>, т.е. обладать физическим смыслом, что увеличивает вероятность однозначной связи предложенного критерия с субъективной оценкой влияния шума.

Для определения шумэкспозиции были составлены карты шумов для следующих профессий: токарь, преподаватель, инженер-конструктор. Для анализа были приняты следующие расписания рабочего дня:

- для токаря с 7.30 до 16.00 с перерывом на обед 30 минут;
- для преподавателя – 4 учебные пары в первую смену со стандартными перерывами;
- для инженера-конструктора – с 8.00 до 17.00 с перерывом на обед в 60 минут.

Время перемещения «дом - работа» было принято равным 35 минутам.

По известным уровням шумов на рабочих местах, в транспортных средствах, в жилых помещениях и на территории жилой застройки, а также в соответствии с проведенными измерениями были построены карты шумов в функции времени для токаря, преподавателя и инженера-конструктора, представленные соответственно на рис. 1-3.

Анализ вышеприведенных карт позволяет сделать следующие выводы.

1. Представители разных профессий испытывают отличающееся по распределению во времени и уровню шумовое воздействие во время выполнения профессиональных обязанностей.

2. В свободное от работы время представители любой профессии в условиях города получают одинаковую экспозицию шума.

3. Шумэкспозиция как суммарная плотность шумовой энергии в течение суток определяется не только характером профессиональной деятельности, но и уровнем шума в свободное время суток.

4. Так как состояние здоровья человека зависит не только от уровня воздействующего шума, но и от длительности воздействия, то для сохранения здоровья необходимо снижать уровень шума не только при профессиональной деятельности, но и в окружающей человека среде.

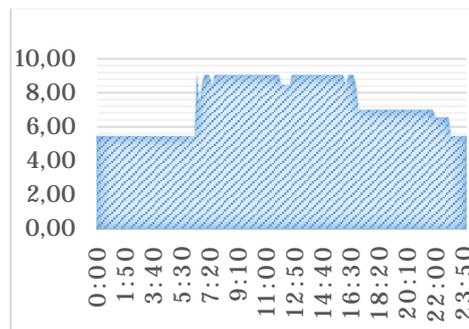


Рисунок 1 – Карта шумов для токаря

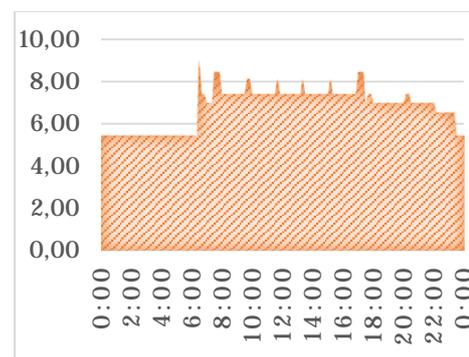


Рисунок 2 – Карта шумов для преподавателя

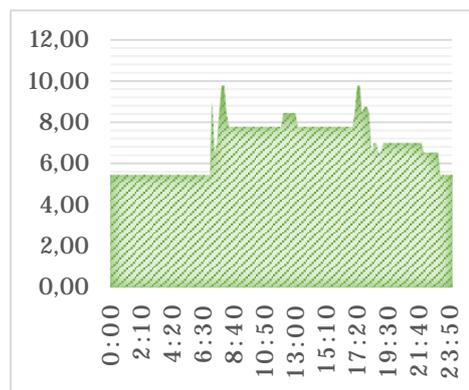


Рисунок 3 – Карта шумов для инженера-конструктора

1. Тейлор, Р. Шум. / Р. Тейлор, под ред. М. А. Исаковича. – М.: Мир, 1978. – 308 с.
2. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы. Шум на рабочих местах, в транспортных средствах, в помещениях жилых, общественных зданий на территории жилой застройки: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 16 ноября 2011 г., № 115.
3. Иващенко, О.Н. Акустический шум и его воздействие на человека / О.Н. Иващенко // Наука и современность. – 2010. – №4–2. – С. 26–29.
4. Иванов, Н.И. Инженерная акустика; Теория и практика борьбы с шумом: учебник. – М.: Логос, 2008. – 424 с.

УДК 628.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАССОВОЙ СКОРОСТИ СГОРАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗВИТИИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Невдах В.В., Антошин А.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Известно, что массовые скорости сгорания различных материалов в ограждениях при достаточном количестве кислорода выше, чем скорости горения этих же материалов в открытом пространстве из-за роли ограждений в организации обратного теплового потока к горючим материалам [1]. При пожарах в реальных помещениях достаточное количество кислорода обычно бывает только на начальной стадии пожаров. С течением времени возрастает влияние не только ограждений, но и ограниченного количества кислорода на скорость сгорания материала.

Целью настоящей работы было компьютерное моделирование пожара в помещении и исследование динамики массовой скорости сгорания материалов при развитии пожара.

Моделирование пожара выполнялось с использованием программы FDS (Fire Dynamics Simulator), в которой реализована универсальная полевая модель пожара на основе уравнений в частных производных Навье-Стокса, выражающих законы сохранения тепло-, массо-переноса при пожаре в каждом элементарном объеме расчетной области [2]. С помощью графического интерфейса PyroSim в расчетной сетке, состоящей из кубических ячеек с ребром 0.1 м, была создана модель помещения - комнаты с внутренними размерами 4.2×3.8×2.4 м (рисунок 1).

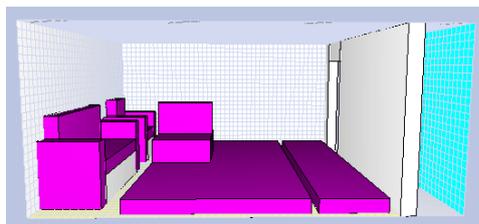


Рисунок 1 – Модель помещения

В комнате есть мебель и другие предметы из горючего материала. На полу лежат два мата с размерами 3,9×2,4×0,2 и 4,2×0,9×0,2 м, также сделанные из горючего материала. Исследовалась динамика распространения пламенного горения пожара длительностью 1200 секунд в комнате с различными условиями естественной вентиляции. Пожар инициировался источником с размерами 0,1×0,1 м и с тепловыделением 10 кВт, помещаемым на сидение дивана рядом со спинкой. Процесс горения горючего материала моделировался реакцией горения полиуретана - одного из самых распространенных материалов, используемых при изготовлении мягкой мебели [3]. Моделировались пожары, как в

закрытой комнате, так и в комнате с естественной вентиляцией через отверстия разного размера в стене с дверью размерами 2,0×0,9 м, расположенной напротив дивана (см. рисунок 1). Контролировались основные параметры пожара, влияющие на его распространение – массовая скорость горения, величина полного тепловыделения и его радиационная составляющая.

Рисунок 2 иллюстрирует динамику массовой скорости сгорания материала на начальном этапе пожаров в закрытой комнате, с естественной вентиляцией через открытую дверь и через отсутствующую стену.

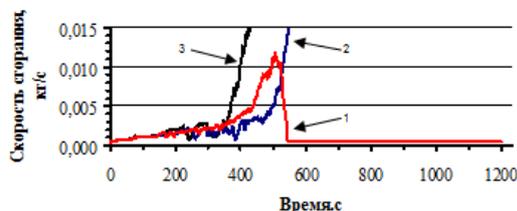


Рисунок 2 – Зависимости скорости сгорания полиуретана от времени при пожаре в закрытой комнате (1), с вентиляцией через дверь (2), через проем в стене (3)

Видно, что в течение первых ~ 375 секунд скорости сгорания для трех рассматриваемых пожаров растут примерно по одинаковому закону. Это означает, что для этих пожаров реализуется одинаковый режим горения, контролируемый горючим материалом. Далее скорости сгорания начинают зависеть от условий вентиляции, что соответствует режиму горения, контролируемому кислородом. Динамика тепловыделения для этих трех пожаров показана на рисунке 3, а картины распространения пламенного горения на рисунках 5 (а–е).

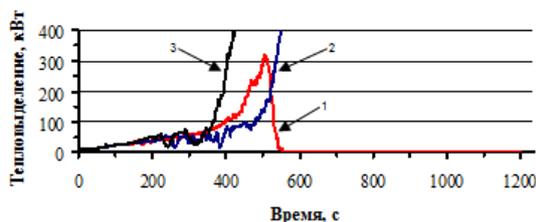


Рисунок 3 Зависимости тепловыделения от времени при пожаре в закрытой комнате (1), с вентиляцией через дверь (2), через проем в стене (3)

Изменение полной динамики скорости сгорания топлива и радиационной составляющей тепловыделения при изменении условий протекания пожара в комнате показано на рисунках 4 (а, б).

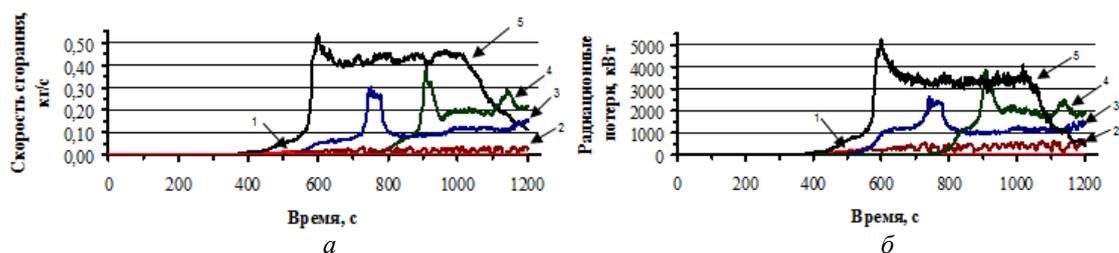


Рисунок 4 – Зависимости скорости сгорания материала (а) и радиационной составляющей тепловыделения (б) от времени при пожаре в закрытой комнате (1), с вентиляцией через нижнюю половину двери (2), дверь (3), двойную дверь (4) и проем в стене (5)

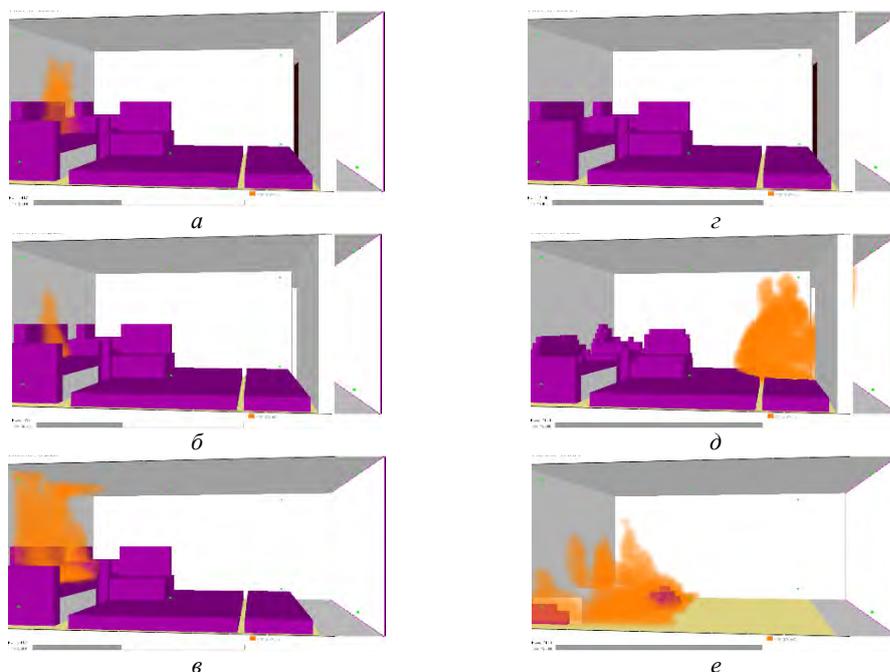


Рисунок 5 – Картины распространения пламенного горения на 500-й (а–в) и 1200-й секунде (г–е) пожаров в закрытой комнате (а, г), с естественной вентиляцией через открытую дверь (б, д) и через проем в стене (в, е)

В работе на примере реакции горения полиуретана показано, что режимы горения материала определяют динамику массовой скорости сгорания материала, тепловыделения, его радиационной составляющей и распространения пламенного горения при пожаре в помещении с разными условиями естественной вентиляции.

1. Drysdale D. An Introduction for Fire Dynamics. Third edition. Willey, 2011. - 551p.
2. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2009. – 94 p.
3. Evaluating models for predicting full-scale fire behaviour of polyurethane foam using cone calorimeter data / J.U. Ezinwa [et al.] Fire Tech., 2014, V. 50. P. 693–719.

УДК 628

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ И СМЕЖНЫХ С НИМ ПРОСТРАНСТВАХ

Антошин А.А.<sup>2</sup>, Волков С.А.<sup>1</sup>, Олефир Г.И.<sup>2</sup>, Голубев А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Большое количество пожаров в жилых помещениях связано с особенностями объемно-планировочных решений, свойствами пожарной нагрузки, особенностями поведения людей в таких помещениях. Современные исследования в

этой области [1–3] направлены на исследования окружающей среды в жилых помещениях различного функционального назначения в условиях пожара, и разработку методик таких исследований. Однако до сих пор отсутствует информация

о методиках исследования распределения продуктов горения по высоте помещения, включая токсичные удушающие и раздражающие газы.

Целью настоящей работы является разработка методики исследования распределения продуктов горения, включая токсичные продукты удушающего и раздражающего действия как по высоте помещений стандартной квартиры в жилом панельном доме, так и по ее площади. Исследования в условиях пожара окружающей среды в жилых помещениях и смежных с ними пространствах здания позволит определить требования к тестовым пожарам и разработать методику испытаний пожарных извещателей, предназначенных для защиты жилых помещений и находящихся в них людей.

Анализ публикаций позволил определить перечень подлежащих контролю факторов пожара и тип горения при котором должны контролироваться характеристики окружающей среды. Показано, что для достижения поставленной цели необходимо контролировать температуру, оптическую плотность газовой среды в горящем помещении и смежных с ним пространствах, способность среды рассеивать оптическое излучение и концентрацию газообразных продуктов горения (CO, HCl, HCN, HF, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>). Размещение системы контроля температуры и оптических характеристик среды на основе адресно-аналоговой системы пожарной сигнализации «Болид» показано на рисунке 1.

В качестве очагов пожара для жилой комнаты предложен макет мягкой мебели, для спального помещения – макет матраса, моделирующий как пламенное горение так и тление, для кухни – горение различных продуктов питания (масло, пища на плите). В качестве источников зажигания использованы тлеющая сигарета (для имитации тлеющего пожара) и газовая горелка (для имитации пламенного пожара).

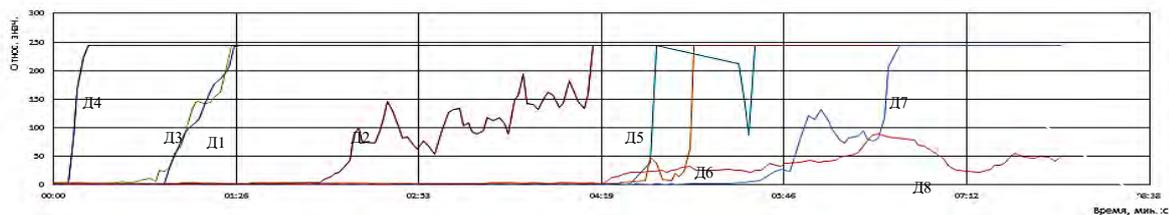
Для измерения температуры газовой среды применяются термодатчики С2000-ИП-03 на ос-

нове адресно-аналоговой системы пожарной сигнализации, производства НПВ «Болид». Для измерения интенсивности рассеянного оптического излучения использованы оптико-электронные адресно-аналоговые извещатели ДИП-34А-04, работающие на принципе обратного рассеивания.



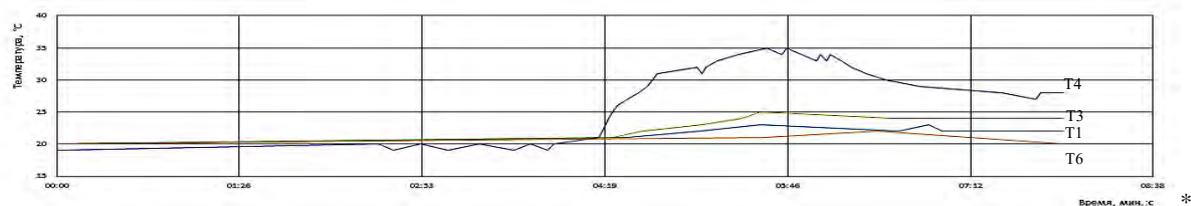
Рисунок 1 – Размещение системы контроля температуры и оптических характеристик в среды на основе адресно-аналоговой системы пожарной сигнализации «Болид»

На рисунках 2 – 4 приведены экспериментальные результаты, полученные с использованием разработанной и изготовленной системы контроля характеристик окружающей среды при горении макета мягкой мебели в испытательной камере размерами 3×3×2,5 м. Замеры производились в 8 точках Точка 1 располагалась в вентиляционном канале. Точки 2-4 располагались под потолком по центру помещения. Точки 5–8 размещались по центру помещения на высотах 0,5; 1; 1,5 и 2 м.



Д1 – Д8 - зависимости интенсивности рассеянного оптического излучения от времени горения макета мягкой мебели в точках 1–8

Рисунок 2 – Зависимости интенсивности рассеянного оптического излучения в разных точках пространства помещения от времени горения макета мягкой мебели



T1, T3, T4, T6 - временные зависимости температуры в точках 1,3,4,6 контролируемого пространства

Рисунок 3 –Изменение температуры в разных точках помещения при пламенном горении макета мягкой мебели

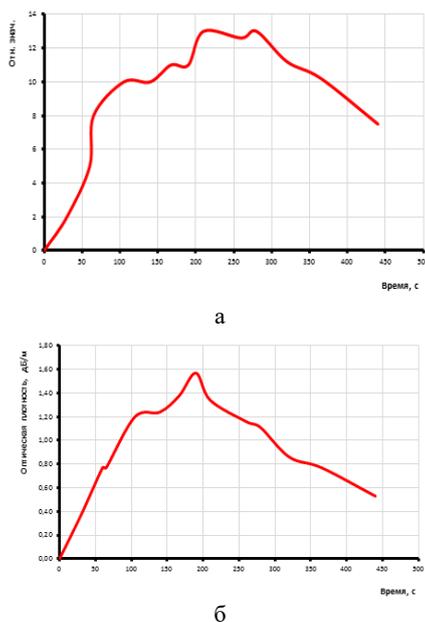


Рисунок 4 – Изменение во времени интенсивности рассеянного излучения (а) и оптической плотности среды (б) при горении макета мягкой мебели в точке Д1

Для измерения концентрации CO, HCl, HCN, HF, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> используются газоанализаторы «Бинар 2П», Testo 320 и Multilyzer-NG. Разработанная методика выполнения измерений состава и пространственного распределения газовой смеси, образующейся при пожаре в жилых помещениях и смежных с ними пространствах, предусматривает определение основных компонентов, образующихся при горении материалов характерных для жилых помещений. Полученные с помощью такой системы результаты позволяют сформулировать основные требования к извещателям пожарным, для жилых помещений и разработать методики их испытаний.

1. Beji T., Verstockt S., Van de Walle R., Merci B. Global analysis of multi-compartment full-scale fire tests ('Rabot2012') // Fire Safety Journal 76 (2015). P. 9–18.
2. Cleary T. G. Improving Smoke Alarm Performance – Justification for New Smoldering and Flaming Test Performance Criteria // NIST Technical Note 1837, 27 p. (July 2014).
3. Cowlard A. Jahn W. Rein G. Torero J. L. Sensor Assisted Fire Fighting Fire Technology // 2010, Volume 46, Issue 3, pp 719–741.

УДК 539.2

## ГЕТТЕРИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Русакевич Д.А.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Выращивание эпитаксиальных слоев является одним из важнейших этапов формирования полупроводниковых приборных структур. Эпитаксиальный слой должен либо полностью повторять кристаллографические свойства подложки, либо иметь их близкими к идеальным. Однако реально получаемые слои могут иметь электрофизические свойства, существенно отличающиеся от планируемых. Это несоответствие, в значительной степени обусловлено возникновением дефектов в процессе наращивания эпитаксиальных слоев или наличием нежелательных примесей. На практике используют несколько основных способов улучшения характеристик эпитаксиальных слоев, в частности, с использованием методов геттерирования [1].

В процессе геттерирования происходит связывание подвижных, нежелательных примесей и дефектов в нейтральные ассоциации. Основными механизмами геттерирования примесей являются:

- Образование пар ионов. При легировании образца геттерирующей примесью образуются нейтральные пары.
- Геттерирование с использованием нарушенных слоёв.

– Внутреннее геттерирование. Чаще всего реализуется при ионном легировании.

Использование редкоземельных элементов в качестве геттерирующей примеси в кремнии приводит к уменьшению концентрации точечных дефектов, неконтролируемых примесей; позволяет повысить стойкость полупроводниковых приборов к внешним воздействиям, в частности, к радиационному излучению. Обычно легирование полупроводников редкоземельными примесями осуществляется либо из поверхностного источника, либо в процессе роста эпитаксиального слоя. Атомы редкоземельных элементов влияют на накопление термодфектов, возникающих при термообработке в процессе изготовления кремниевых полупроводниковых приборов и ИС. Редкоземельные элементы в кремнии активно взаимодействуют с кислородом как в процессе выращивания эпитаксиальных слоев, так и в твердой фазе, осуществляя своеобразную очистку кремния. При легировании кремния редкоземельными элементами время жизни неравновесных носителей заряда увеличивается в 4 – 6 раз, в зависимости от вида редкоземельного элемента.

Можно предположить, что и при использовании редкоземельных элементов в качестве геттерирующей примеси в процессе эпитаксиального выращивания также будет достигнут положительный эффект. Однако традиционно используемый при эпитаксии кремния газозащитный метод легирования не позволяет вводить редкоземельные элементы в состав растущего эпитаксиального слоя. Для легирования эпитаксиальных слоев кремния во время их роста редкоземельными элементами можно воспользоваться методами твердофазного легирования, например, газоразрядным в режиме тлеющего разряда или лазерными методами.

При методе газоразрядного легирования в режиме тлеющего разряда в газоразрядную камеру помещаются электроды, содержащие основную легирующую примесь и редкоземельную геттерирующую примесь. К электродам предъявляются требования электропроводимости и высокой однородности своих свойств. В процессе легирования на электроды, содержащие примесь, подается высокое напряжение (несколько кВ); в межэлектродном пространстве формируется газоразрядная плазма, содержащая и легирующую, и геттерирующую примеси. С

потоком газа – носителя примеси попадают в реактор эпитаксиального наращивания и встраиваются в кристаллическую решетку наращиваемого эпитаксиального слоя. Аналогично для редкоземельного геттерирования может быть использован и лазерный метод, когда материал мишени с редкоземельной примесью испаряется лазерным лучом. Концентрацию редкоземельной примеси в эпитаксиальном слое можно изменять, регулируя параметры разряда или мощность лазерного излучения.

Предлагаемый метод внедрения геттерирующей примеси прост, позволяет во время роста эпитаксиальной пленки одновременно вводить и основную и геттерирующую примесь, характеризуется хорошей управляемостью.

1. Пилипенко, В.А./ В.А. Пилипенко, В.В. Горушко, А.Н. Петлицкий, А.С. Турцевич, С.В. Шведов Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем // Технология и конструирование в производстве интегральных схем. –2013. –№ 2–3– С. 43–57.

УДК 620.179.14

## USING WIRELESS DATA TRANSMISSION IN EDDY CURRENT NONDESTRUCTIVE TESTING

**Petrik V., Protasov A., Seriy K., Lysenko I.**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Kyiv, Ukraine*

Modern development of technology makes it possible to find a new application for means that provide the acquisition, transformation and information transmission through the communication channel.

The purpose of this work is to try to use such tools to create a universal system for nondestructive testing of remote objects, information on the state of which is transmitted operatively over long distances for further processing and making the necessary decision.

In [1, 2], an analysis of possible technologies for wireless data transmission in flaw detection was carried out, and in [3, 4] some were implemented. However, the coverage radius of the monitored territory is limited to hundreds of meters.

GSM technology is proposed to significantly increase the distance at which information can be collected for wireless transmission to the server. The most optimal way to transfer data over the GSM network is to use GPRS technology. The most optimal way to transfer data over the GSM network is to use GPRS technology. Its main feature is the ability to connect permanently a subscriber to the network, i.e., the presence of an active virtual communication channel. For the time of transmission of the data packet, the subscriber is provided with a real (physical)

radio channel, which for the rest of the time is used to transmit packets of the other network users.

Thus, the subscriber does not occupy the physical channel permanently and therefore pays only for traffic, and not for the entire session time. As a result, the cost of transferring a megabyte of information is reduced significantly. GPRS technology is optimal for applications in continuous or quasi-continuous monitoring of production processes, control of mobile and stationary objects, and for supporting applications in which the low cost of traffic has a key role.

The maximum possible data exchange rate with the help of GPRS technology can theoretically reach 170 Kbit / s. As a data transfer channel, the use of a TCP / IP network is proposed, and the physical protocol is GPRS. In this case, each of the network devices is assigned a unique IP-address. With respect to our system, different options are possible for allocate the IP addresses of the information processing center (IPC) and concentrators of control sensor networks.

The most common variant is the presence of a static IP-address in the IPC, and the subscribers have dynamic IP-addresses. The static IP-address is allocated by the IPC not by the cellular operator, but by the Internet provider when the IPC is connected to the

Internet through a dedicated access channel (formed using LAN, ADSL or other technologies).

At the moment, the task of creating a device with a convenient and flexible data transmission and processing system that can transfer them to various devices, including a WEB server, and to save data on removable small-size media for further processing is solved.

The system is based on the STM32F7 microcontroller with the ARM Cortex-M7 core. The system has developed a frequency synthesizer based on the AD9850 chip, which operates in the range 1Hz - 40 MHz, which allows the use of sensors of various types and configurations. Data transfer is carried out using the Wi-Fi module ESP 8266. With this module, information can be transferred to various devices (computer, smartphone, and tablet) for processing.

The possibility of recording data from the sensor to a removable FLASH medium is developed. To process and output data on a computer, the LabVIEW environment is used. The breadboard model of the developed system with wireless transmission of information is shown in Fig. 1.



Fig. 1. Model of the developed control system

Now, work is under way to improve the methods of transmission and processing of information, as well as optimizing the system.

As a data transmission device, several cell phones and GSM modems were considered. During the testing, Wavcom GSM / GPRS modem Fastrack showed the best results due to the support of multiple transmission protocols, low power requirements and high sensitivity of the receiver and transmitter power.

The basis of the communication module can be taken by the development of Wavcom - the wireless processor Q2687. It includes a 32-bit microcontroller, a GSM transceiver, and many external data buses. This processor is the core of the system being developed, which performs all the communication functions and the basic logic of working with the measuring transducer.

The program implemented on the module performs the following functions:

- continuous status check of the transmitter and GSM network;
- accumulation of instantaneous parameter values for technical accounting purposes;
- tracking the presence of all indicators within the acceptable limits, in case of going beyond them -

notification about this through the GPRS-channel and SMS;

- periodic interrogation of the average hourly values of the measured parameters and their transfer to the central base via the GPRS channel;
- when receiving a voice call - sending the current instantaneous values of the measured parameters to the central database;
- when receiving a CSD call, the organization of a direct connection to the transmitter for programming or reconfiguration;
- if it is not possible to use one mobile operator network for work, automatic switching to the use of an alternative network.

For experimental studies, a piece of aluminum АД31Т5 with a thickness of 5 mm (Fig. 2) was chosen with defects of the crack type: depth from 0.1 mm to 3 mm, opening 1 mm. The control was carried out using a differential overlaid eddy current transducer (ECT) [5].



Fig. 2. The test sample

In Fig. 3 shows the experimentally obtained dependences of the amplitude of the ECT signal on the crack depth as a result of monitoring at different frequencies.

To date, a basic module has been developed for solving the problem of transmitting information about the status of the monitoring object in the IPC, which implements Wi-Fi technology.

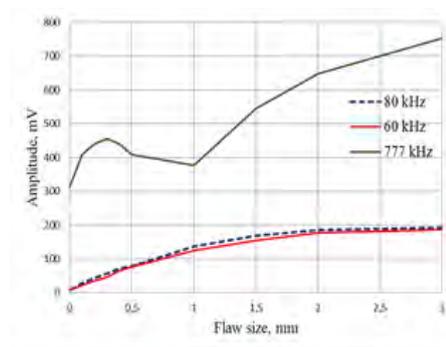


Fig. 3. Dependences of the sensor signal amplitude on a crack depth

Studies of the use of data transmission in the creation of a universal system for non-destructive testing of remote sites demonstrated the convenience of control, the ability to quickly transfer control data over long distances without loss, the ability to access the results of several operators, further processing by several algorithms at the same time for a more accurate result. Similarly, the use of such systems simplifies and speeds up the procedure for comparing the results of control of similar objects.

1. Використання безпроводних технологій передачі даних для вирішення задач у неруйнівному контролі / О.Л.Кустовський, В.Ф.Петрик, К.М.Серий, Д.О.Мельник // Вісник НТУ «ХП». 2012. - № 40. — С.71-77.
2. Петрик В.Ф. Использование беспроводных технологий в дефектоскопии / Петрик В.Ф., Ковтун Г.М., Топиха Д.М. // Научни Известия НТСМ: материалы междуна. конф. «Дни НК 2014». – Созополь, 2014. – № 150. – С. 486–488.
3. Телеметрический вихретоковый дефектоскоп / А. Г. Протасов, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Научни Известия НТСМ: материалы международной

- конференции «Дни НК 2014». – Созополь, 2014. – № 150. – С. 34–36.
4. Вихрострумовий дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку / А.Г.Протасов, К. М. Серий, О. Л. Дугін, В. Ф. Петрик // Вісник НТУ «ХП», 2014. – № 19. – С. 132–139.
5. Lysenko I., Kuts Y., Dugin O., Protasov A. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] The e-Journal of Nondestructive Testing. 2016, № 7, Vol. 21, access mode: <http://www.ndt.net>.

УДК 681.2.084; 53.083.62

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКА С УПРУГОПОДВЕШЕННОЙ ПОДВИЖНОЙ МАССОЙ

Оксенчук И.Д., Кривицкий П.Г., Францкевич А.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В статье [1] на основе анализа открытых литературных источников авторы отмечают, что в настоящее время существует потребность в создании недорогих, надежных, компактных гравитационных градиентометров. В тоже время отмечается кризис идей для их создания. Теми же авторами предложено использовать дифференциальный емкостной датчик с упруго подвешенной подвижной массой (ЕДПМ). В статье [2] излагаются результаты теоретических исследований датчика, модель которого приведена на рисунке 1.

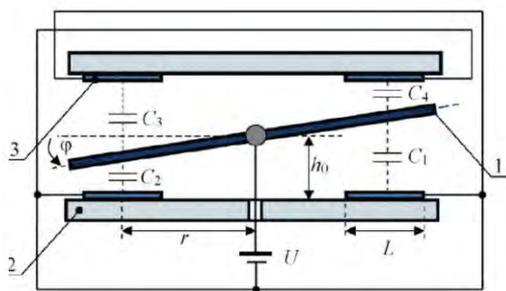


Рисунок 1 – Модель ЕДПМ датчика

Отличительной особенностью такого датчика является использование конденсаторов для понижения крутильной жесткости торсионов до единиц герц. Сами торсионы при этом имеют геометрические размеры, обеспечивающие требуемый запас прочности конструкции. С другой стороны, ток перезарядки конденсаторов, возникающий при смещении подвижной массы, используется для регистрации величины смещения.

В представленном докладе дано описание экспериментальной установки и результаты ее работы, показывающие техническую реализуемость предлагаемого дифференциального ЕДПМ.

Исследовавшийся дифференциальный ЕДПМ состоит из подвижной массы, торсионов и опоры торсионов, изготовленных из цельного куска

немагнитной стали. Габаритные размеры подвижной массы 120x40x10 мм. Торсионы имеют длину 1,25 мм, диаметр 0,95 мм. Четыре пластины конденсаторов крепятся к опорам торсионов через фторопластовые прокладки толщиной 150 мкм винтами.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

Установка включает: исследуемый дифференциальный ЕДПМ; модуль регистрации микротоков; модуль задания высоковольтных напряжений; модуль контроллера управления и сбора данных. Питание осуществляется от лабораторного двухканального блока питания. Управление работой и запись полученных данных проводится на персональный компьютер, на который установлена специально разработанная программа-монитор.

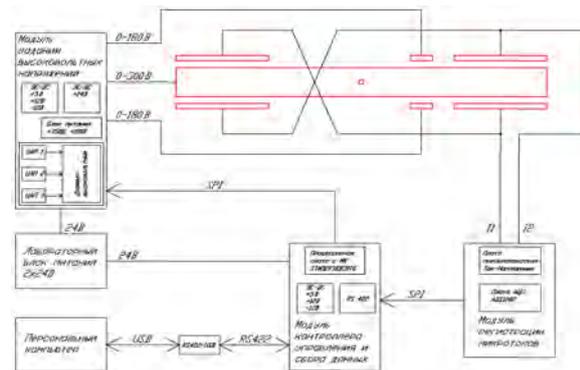


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки

Датчик установлен на подставку с тремя опорами, регулируемые по высоте. Электрическая изоляция датчика от подставки обеспечивается фторопластовой прокладкой. Над чувствительным элементом на подставке установлен блок электронных модулей (рисунок 3). Данная конструкция помещается в вакуумную камеру, установленную на развязанном фундаменте.

До установки на дифференциальный ЕДРД пластин конденсаторов была определена резонансная частота крутильных колебаний подвижной массы. Она составила 11,8 Гц, а добротность превосходила 3000.

При проведении экспериментов удавалось понизить резонансную частоту колебаний до 1,8 Гц за счет подачи на конденсаторы напряжения порядка 235 В. Однако, за 20 – 30 минут частота плавно повышалась до величины порядка 3,5 Гц и затем оставалась стабильной длительное время. Добротность колебательной системы составляла порядка 70 – 90.

На рисунке 4 приведен пример шума токового сигнала на выходе датчика. Пик шума на частоте 3,5 Гц обусловлен наличием резонанса дифференциального ЕДПМ на данной частоте.

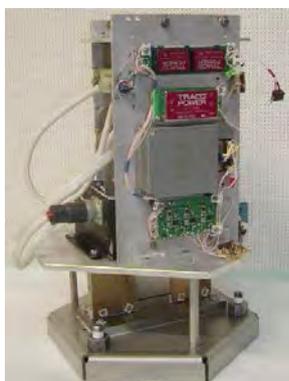


Рисунок 3 – Блок чувствительного элемента

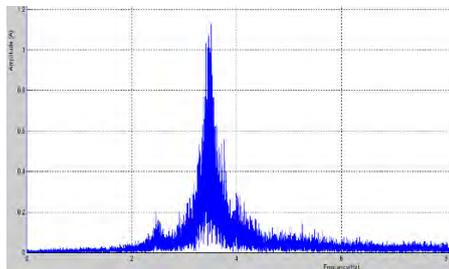


Рисунок 4 – Спектр шума токового сигнала на выходе датчика

При выполнении высокоточных измерений одним из важнейших является вопрос величины технических шумов измерительной установки и их источник.

Проведенное экспериментальное исследование шумов рассматриваемой установки позволило установить, что шумы в интересующей полосе частот 2 – 4 Гц обусловлены прежде всего:

- флуктуациями напряжения прикладываемого к конденсаторам ЕДПМ;
- вибрациями основания, на котором установлен дифференциальный ЕДПМ.

Для идентификации шумов, связанных с флуктуациями напряжения прикладываемого к конденсаторам ЕДПМ на опоры торсионных крепились пластины, которые обездвиживали подвижную массу. Эта мера устраняла влияние

сейсмических колебаний на чувствительный элемент. Сигнал преобразовывался в цифровой вид АЦП модуля регистрации микротоков с частотой дискретизации 250 Гц. В файл записывался 1 млн. выборок. График спектра строился с помощью стандартной функция MATLAB fft, реализующей метод быстрого преобразования Фурье.

Было показано, что после подачи напряжения на выходе дифференциального ЕДПМ в области 2 – 4 Гц амплитуда шумового сигнала возрастает с 0,05 фА до 0,6 фА. Причем амплитуда шума практически не зависит от абсолютной величины поданного на датчик напряжения.

Для получения данных о шумах установки связанных вибрациями основания, были сняты пластины, обездвиживавшие подвижную массу. Вакуумную камеру откачали. Данные записывались в файл с 19:00 вечера до 10:00 утра следующего дня. Частота дискретизации АЦП была 250 Гц.

На рисунке 5 представлен график полученных данных. Видно, что вибрации основания существенно уменьшаются с 1 часа ночи до 4 часов утра. Это время минимального движения транспорта, прежде всего трамваев и метро. Мгновенная амплитуда колебаний тока сигнала в данный период времени не превышала 10 пА.

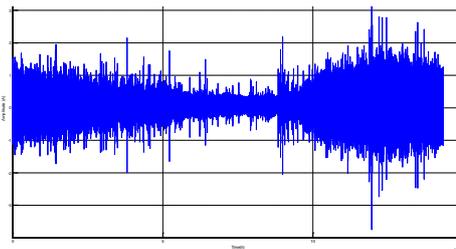


Рисунок 5 – Шумы токового сигнала, связанные с вибрациями основания

Исследование спектра шума в ночной период показало, что в области от 2 Гц до 5 Гц его амплитуда не превышала 1 фА. В дневное время амплитуда шума увеличивалась, но не более чем в три раза.

Проведенные исследования показали техническую реализуемость дифференциального ЕДПМ. Возможность понижения резонансной частоты колебаний датчика до 3,5 Гц, а также полученный достаточно низкий уровень шумов в установке, позволяют приступить к экспериментам по регистрации изменений градиента гравитационного поля.

1. Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н. Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов: обзор. Приборы и методы измерений. – 2016. – Т.7, №3. – С. 235–246.
2. Gilavdary I., Mekid S., Riznookaya N., Abdul Sater A. Static and dynamic stability of gravi-inertial sensors with capacitive differential system of sensitivity adjustment / Приборы и методы измерений. – 2016. –Т. 7, №1. – С. 16–23.

## УГРОЗЫ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ RFID И NFC МЕТОК

Ковыньёв Н.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация*

В настоящее время метками на основе ближней радиосвязи (NFC) и радиочастотными метками (RFID) оснащаются многие товары повседневного пользования, включая кредитные и платежные карты, водительские удостоверения, идентификационные карты, паспорта, проездные билеты на метро и т.д. NFC и RFID чипы, использующие беспроводную радиосвязь для передачи информации, также находят применение в аптеках для отслеживания, транспортировки и отправки продукции.

Эти технологии позволяют пользователям активировать карточки с помощью сканирования, не прикасаясь к терминалу, так как RFID и NFC срабатывают даже в бесконтактном режиме. Однако технологии RFID и NFC имеют ряд уязвимых мест, которые при отсутствии необходимых мер безопасности облегчают мошенникам кражу ценной информации. Сразу после появления NFC и RFID на рынке в их работе были выявлены неожиданные просчеты, поэтому существуют определенные опасения в отношении возможности считывания и копирования информации с таких карт хакерами.

Электронные кражи (e-pickpocketing) – это новый термин для обозначения кражи информации с карты без какого-либо контакта с ней. Чипы RFID позволяют считывать данные на расстоянии до нескольких метров. Все, что нужно для связи с меткой в документах – купить готовое устройство на eBay. Считыватели близкого радиуса действия стоят около 50 долларов, дальнего – порядка сотни. После считывания у злоумышленника на руках остается полная электронная копия всей информации RFID-метки. С ее помощью можно сделать поддельную копию, либо использовать другими методами – в зависимости от типа украденного документа. Терминалы будут воспринимать копию в качестве оригинала. Доказать обратное практически невозможно [1].



Рисунок 1 – Пример считывания RFID

NFC фактически является вариацией RFID, хотя и обладает меньшей дальностью – всего несколько сантиметров. Но это – только для заводских, лицензионных устройств. Исследователи из британского Университета Суррей смогли считать данные по NFC на расстоянии до 80 см.

Испанские хакеры и вовсе научили Android-смартфоны превращаться в ретранслятор NFC-сигнала, распространяющего собственные важные данные. Подобный подход позволяет провести платеж прямо через смартфон владельца. Но есть и другие способы. Например, подключившись через NFC другим смартфоном или серийно выпускаемым ридером с помощью приложения все необходимые данные карт, использованных при операциях в браузере. Далее достаточно найти магазин, позволяющий проводить оплату без ввода указания CSV-кода (а такие еще существуют). Учитывая серьезность проблемы электронных краж, ученые предлагают новые технологии обеспечения безопасности RFID-карт. Давайте рассмотрим некоторые из этих инновационных методов.[2]



Рисунок 2 – Пример взаимодействия NFC

Если Вы предпочитаете изготавливать оборудование в домашних условиях (по принципу «Сделай сам»), Вы можете использовать два материала, препятствующие прохождению радиосигналов – воду и металл. Теоретически вода эффективно блокирует радиосигналы, однако такое решение довольно сложно воплотить в реальности. Металл намного более практичен в использовании, так как, например, алюминиевую фольгу можно приобрести везде, и она доступна по цене. Куска алюминиевой фольги толщиной минимум 27 микрон достаточно для блокирования сигналов RFID и NFC. Для защиты карты от считывания просто заверните ее в алюминиевую фольгу. Разворачивайте карту только перед использованием. Возможно, Вы будете иметь довольно странный вид, используя этот метод, но, тем не менее, он достаточно эффективен.

Вы можете выбрать более стильный вариант защиты и приобрести готовые защитные корпусы и бумажники, блокирующие RFID-сигналы. Такие компании, как, например, Identity Stronghold продают различные аксессуары, которые могут защитить карты от электронных краж. В настоящее время правительство США требует, чтобы все государственные служащие пользовались подобными защитными корпусами для идентификационных карт.

Для предотвращения копирования меток RFID и NFC можно использовать криптографию. Одно-разовый код или код, непрерывно изменяющийся после каждого сканирования, можно использовать для того, чтобы помешать перехватчикам записывать операции для последующего воспроизведения. Даже если мошенникам удастся украсть одноразовый код, они не смогут им воспользоваться.

Для более сложных устройств также можно использовать аутентификацию методом «запрос-ответ» в тех случаях, когда метка взаимодействует с ридером. При таком типе аутентификации ридер выдает метке запрос, а метка в свою очередь отвечает секретным цифровым кодом, который может быть основан на симметричной или двухключевой криптографии. При использовании этого протокола, информация не передается по небезопасному каналу связи между ридером и меткой.

Ученые Инженерной школы Свенсона Питтсбургского университета (Pittsburgh Swanson School of Engineering) разработали метод предотвращения мошенничества с RFID с помощью использования технологии включения и выключения карты при контакте с ее определенным участком при сканировании.

Профессор Марлин Микл (Marlin Mickle), доктор технических наук и исполнительный директор Научно-инновационного центра по RFID-технологиям (RFID Center for Excellence) в Школе Свенсона заявил, что новая технология «позволяет блокировать кредитные карты на основе RFID или NFC, когда они лежат в кармане или на столе, и предотвращает их считывание мошенниками с использованием портативных сканеров». Карту невозможно считать, пока кто-либо не включит ее.

«Наша новая разработка включает антенну и электросхему, контакты которой можно разорвать простым переключением, как, например, при выключении освещения дома или в офисе, -

говорит Микл. - Кредитная карта на основе RFID или NFC блокируется, если она остается в кармане или лежит на какой-либо поверхности, и мошенники не могут считать ее с помощью портативных сканеров. Это весьма простое и недорогое решение, которое можно использовать в процессе изготовления кредитных карт на основе RFID и NFC. Мы подали заявку на патент и надеемся на скорое внедрение этой технологии после одобрения патента» [3].

Впрочем, стоит помнить, что металлический кошелек или визитница для карт не исключают возможность кражи данных карт.

1. Не включайте NFC без надобности, не держите его постоянно включенным.

2. То же касается других беспроводных интерфейсов – Bluetooth и Wi-Fi.

3. Проверяйте активность фоновых процессов, при частом обращении к сетевым интерфейсам неподходящих для этого приложений – проверьте смартфон антивирусом.

4. Не устанавливайте приложения из непроверенных источников.

5. Не теряйте и не оставляйте смартфон в людных местах – как средство доступа к данным он может принести куда большую выгоду, вернувшись в ваши руки.

1. Михайлов Д.М., Стариковский А.В. Исследование механизмов проведения атак на RFID-системы// Материалы 2 Всероссийской научной конференции «Научное творчество 21 века». Красноярск: Научно-инновационный центр, 2010. – С. 16–17.
2. Стариковский А.В., Зуйков А.В., Аристов М.С., Степаньян Д.А. Атаки на мобильные телефоны, использующие технологии NFC//Безопасность информационных технологий. – 2012. – №2. – С. 60–64.
3. Макаров В.В., Мамонов С.К. Применение NFC-технологий в мобильных платежах// В мире науки и инноваций: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции: в 2 ч. – 2017. – С. 17–21.

УДК 681

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ TRUEBEAM STX В ГУ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОНКОЛОГИИ И МЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЛОГИИ ИМ. Н.Н. АЛЕКСАНДРОВА»

Петкевич М.Н.<sup>1</sup>, Титович Е.В.<sup>1</sup>, Герцик О.А.<sup>1</sup>, Потепалов П.О.<sup>1</sup>, Киселев М.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Цель работы:** Основным источником радиационной опасности при работе медицинского линейного ускорителя является генерируемое им тормозное излучение широкого энергетического спектра. В дополнение к тормозному излучению при энергии фотонов выше порога реакции

( $\geq 10$  МэВ) происходит фотоядерная реакция и образуются вторичные нейтроны. Для обеспечения радиационной безопасности как персонала, так и пациентов, ускоритель должен быть оснащен системой радиационного контроля, которая использует дозиметрические приборы,

для оценки амбиентного эквивалента дозы, установленные в процедурном помещении, лабиринте и пультовой ускорителя.

**Материалы и методы:** При проектировании системы радиационного контроля стереотаксического медицинского ускорителя Truebeam STx предъявлялись следующие технические требования: автоматическое измерение мощности амбиентной дозы гамма – излучения и амбиентной дозы нейтронного излучения в процедурном помещении, лабиринте и пультовой ускорителя; сбор информации с детекторов (не менее 3-х каналов) и оперативное отображение информации на пульте управления оператора.

С учетом технических требований для обеспечения радиационного контроля был использован измеритель-сигнализатор СРК-АТ2327. Применение этого дозиметрического прибора позволило обеспечить построение гибкой и надежной многоканальной стационарной системы радиационной защиты, предназначенной для проведения контроля радиационной обстановки в бункере, лабиринте и пультовой стереотаксического ускорителя Truebeam STx.

Измеритель-сигнализатор строится на основе интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения: БДКГ-02, БДКГ-04, БДКГ-11/1, БДКГ-17, БДКГ-27, БДКГ-204. бета-излучения БДПБ-01 и нейтронного излучения БДКН-02, БДКН-04.

Данные блоки детектирования представляют собой полностью самостоятельные устройства, осуществляющие измерение мощности дозы гамма- и нейтронного излучения и плотности потока бета-частиц и нейтронов с интервалом 2 секунды и управляющие звуковой и световой сигнализацией, предназначенной для оповещения персонала о возникновении радиационной опасности. Информация с блоков детектирования передается на пульт управления и/или ПК по интерфейсу RS485.

**Результаты:** В настоящее время в РНПЦ ОМР для обеспечения радиационной безопасности персонала и пациентов при работе на линейном ускорителе Truebeam STx используется система из следующих блоков детектирования: БДКГ-04 (3шт.), БДКН-04 (3шт.) и сигнализатор аварийный дозиметрический ДРГ-АТ2331 (3шт.). На рисунке 1 представлена схема расположения всех блоков в помещениях линейного ускорителя. На рисунке 2 показан состав каждого блока.

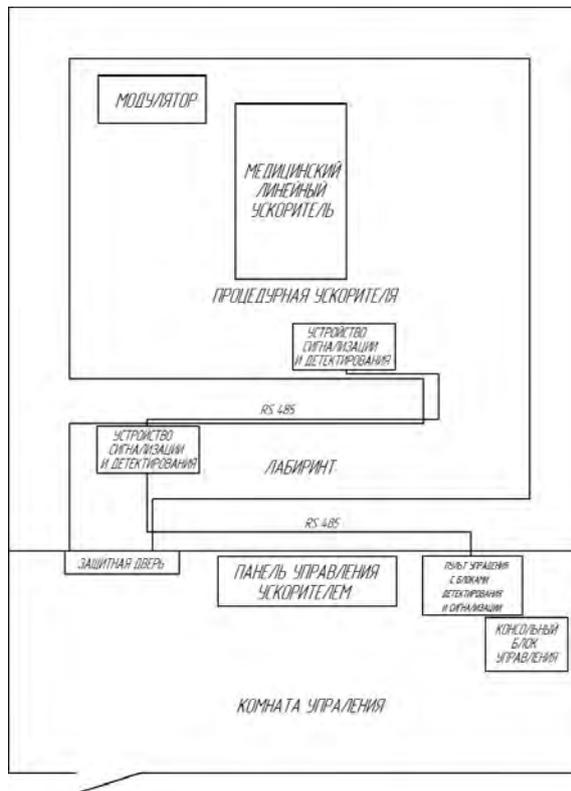


Рисунок 1 – Схема подключения системы радиационного контроля

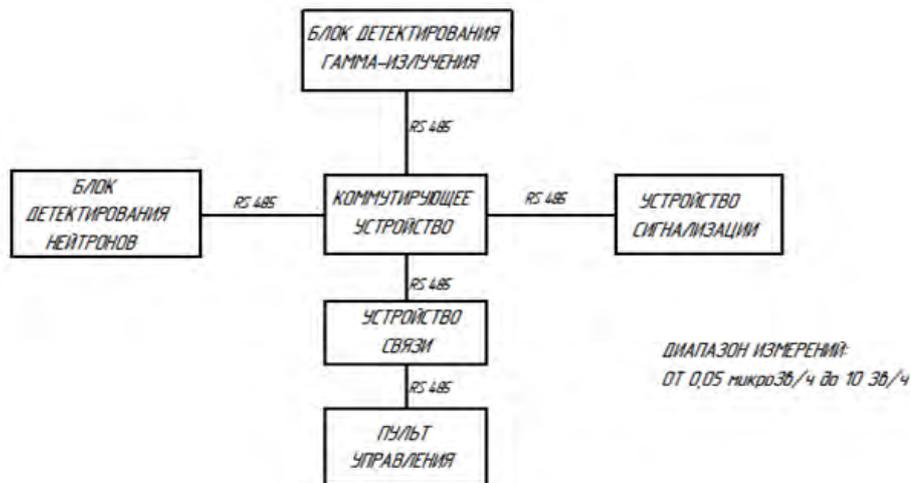


Рисунок 2 – Состав блоков детектирования

**Заключение.** Система радиационного контроля на базе измерителя-сигнализатора СРКАТ2327 позволяет обеспечить требуемый законодательством Республики Беларусь и международными рекомендациями уровень контроля за радиационной обстановкой на линейных ускорителях электронов.

1. Тарутин, И. Г. Радиационная защита в лучевой терапии / И.Г. Тарутин, Е.В. Титович, Г.В. Гацкевич. – Минск : Беларуская навука, 2015. – 212 с.
2. АТОМТЕХ | Приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля [Электронный ресурс] : приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля. – Минск., 2017. – URL: <http://www.atomtex.com/ru>.
3. TrueBeam, TrueBeam STx, Инструкции по эксплуатации. – 2013. – 388 с.

УДК 621.382

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОТРАЖАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСШЕГО КЛАССА ЧИСТОТЫ МЕТОДАМИ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Мухуров Н.И.<sup>2</sup>, Шаронов Г.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

<sup>3</sup>НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ

Минск, Республика Беларусь

Одной из проблем производства деталей современной оптики является отсутствие в настоящее время методов контроля, обеспечивающих контроль качества и выявление дефектов прецизионных отражающих поверхностей с чувствительностью, соответствующей классу обработки поверхности. Существующие методы основываются на ГОСТ 11141-84 [1], предусматривающем использование визуального контроля для выявления таких дефектов, как царапины и точки на поверхности оптической детали. Качество такого контроля зависит от квалификации оператора, вследствие чего получаемые результаты не являются объективными. Кроме того, в ГОСТ 11141–84 отсутствуют критерии оценки качества металлических поверхностей с классом чистоты выше V, что объясняется отсутствием на момент разработки стандарта методов обработки металлов, обеспечивающих более высокую чистоту поверхности. В то же время, современные технологии обработки поверхности, такие как аддитивная технология формирования наноструктурированных покрытий методом анодирования или алмазное наноточение обеспечивают фактическую чистоту поверхности, приближающуюся к “нулевому” классу чистоты (классы 0–10, 0–20, 0–40 согласно ГОСТ 11141-84), однако подтверждение класса чистоты формально невозможно из-за необеспеченности технологий обработки соответствующими методами контроля.

В рамках действующих стандартов рекомендуемым методом контроля чистоты поверхностей IV–IXа классов, к которым согласно ГОСТ 11141-84 относятся металлы, является визуальное наблюдение без использования увеличительных приборов в косонаправленном пучке отраженного света (под углом к оси детали) на фоне черного экрана.

Такой способ исключает объективное определение размеров царапин и точек, поэтому их ширину и диаметр оценивают путем визуального сличения с эталонными образцами. При этом возможно определение результата контроля только в виде бинарной классификации “годен / не годен”, причем результат классификации существенным образом зависит от квалификации, опыта и психофизического состояния оператора, что предполагает высокую вероятность ошибок первого (приемка негодных) и второго (отбраковка годных изделий) рода. Отнесение поверхности к определенной классу чистоты по результатам такого контроля невозможно, также невозможен контроль отражающих металлических поверхностей более высокого класса чистоты.

Результаты проведенных экспериментальных исследований продемонстрировали возможность реализации объективного контроля чистоты прецизионных металлических поверхностей вплоть до “нулевого” класса на основе методов зондовой электрометрии, обеспечивающих бесконтактное определение пространственного распределения работы выхода электрона (РВЭ) поверхности. При этом диагностическое значение имеет не величина РВЭ локального участка поверхности как таковая, а ее отклонения от величины математического ожидания РВЭ для данной поверхности.

Для определения диагностически значимых диапазонов изменения РВЭ поверхности металлов при неразрушающем контроле их дефектов методами зондовой электрометрии были выполнены исследования поверхности заготовок лазерных зеркал из алюминия, обработанных алмазным наноточением по высшему классу точности. Исходя из известных параметров технологического процесса обработки результирующий класс чистоты поверхности

оценивался в пределах от 0–10 до 0–40. Образцы имели вид круглых шайб диаметром 120 мм; для исключения влияния на картину распределения держателя образцов, поверхность которого характеризуется низким качеством и отличными от образца значениями РВЭ, исследования выполнялись на ограниченном участке поверхности без выхода электрометрического зонда за пределы ограниченного участка поверхности образца 25×25 мм.

Измерения, выполненные на материале 8 бездефектных образцов, показали в целом сходные результаты. На рисунке 1 приведены типичные результаты контроля пространственного распределения РВЭ, оцениваемой по распределению потенциала поверхности  $U_{CPD}$  образцов № 1, 4, 5 и 7.

Из полученных результатов хорошо видно, что средние значения (математическое ожидание) потенциала поверхности металлов может существенно различаться даже при одинаковом химическом составе и одинаковых способах обработки поверхности и степени ее дефектности, как в рассматриваемом случае. Так, для приведенных образцов математическое ожидание потенциала поверхности изменяется в пределах от 274 мВ до 319 мВ. Таким образом, как это отмечалось и ранее [2], регистрируемые абсолютные значения потенциала поверхности металлов диагностического значения не имеют.

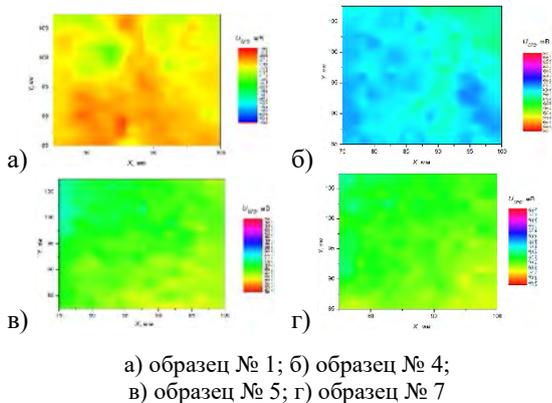


Рисунок 1 – Пространственное распределение РВЭ поверхности оптических деталей высшего класса чистоты

Гистограммы распределения РВЭ поверхности этих же образцов показаны на рисунке 2.

Степень чистоты поверхности при ее контроле методами зондовой электрометрии может быть количественно оценен величиной полуширины гистограммы распределения регистрируемых значений РВЭ или поверхностного потенциала. В приведенных случаях для поверхностей высшего класса чистоты полуширина гистограммы распределения составляла около 5 мВ.

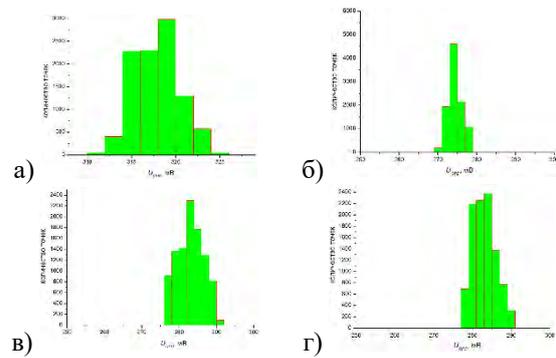


Рисунок 2 – Гистограммы распределения значений РВЭ

Для примера на рисунке 3 приведены пространственное распределение и гистограмма распределения регистрируемых значений РВЭ алюминиевой пластины, подвергнутой плазмохимической обработке и, вследствие неравномерности параметров обработки, содержащей дефекты. Можно видеть, что полуширина гистограммы распределения РВЭ дефектной поверхности значительно превышает 5 мВ и при этом содержит множественные пики, характеризующие различные типы дефектов.

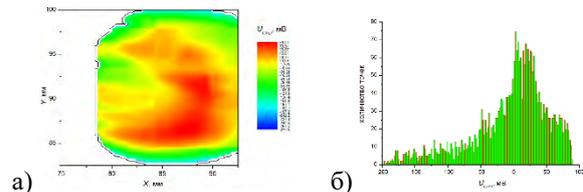


Рисунок 3 – Распределение РВЭ поверхности алюминиевой пластины с дефектами обработки

Результаты исследований показали, что достигнутая чувствительность средств измерений на основе методов зондовой электрометрии обеспечивает контроль дефектов поверхности вплоть до высшего класса чистоты 0-10 и более (обеспечивается обнаружение дефектов с поперечными размерами менее 1 мкм, не выявляемых оговоренными стандартом [1] визуальными методами). Наиболее актуальным является использование методов зондовой электрометрии для контроля прецизионных поверхностей металлов с классом чистоты выше V, поскольку данный вид поверхностей не обеспечен стандартизованными методами контроля.

- ГОСТ 11141–84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля.

2. Воробей, Р.И. Режим самокалибровки зонда Кельвина для контроля электрофизических параметров полупроводниковых пластин / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, А.Н. Петлицкий,

В.А. Пилипенко, А.С.Турцевич, А.К. Тявловский // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 2(9). – С. 46–52.

УДК 621.382

## РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА МОДУЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭДС В КОНСТРУКЦИИ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Минск, Республика Беларусь

Основным назначением разрабатываемых методов и методик измерения, основанных на бесконтактной неразрушающей регистрации изменений потенциала поверхности полупроводниковой пластины при воздействии модулированным оптическим излучением, является измерение пространственного измерения длины диффузии неравновесных носителей заряда (ННЗ) и других параметров полупроводниковой пластины. В качестве рассматриваемых материалов выступает кремний как в виде монокристаллической пластины, так и в форме эпитаксиальных слоев, выращенных на подложке с более высокой, чем у эпитаксиального слоя, степенью легирования. В последнем случае измерения возможны, если толщина эпитаксиального слоя превышает длину диффузии ННЗ не менее чем в 4 раза [1].

При выполнении измерений модулированное оптическое излучение передается в локальную точку поверхности образца, в которой выполняются измерения, посредством гибкого оптоволоконного световода. Диаметр светового пятна должен существенно (в 3-5 раз) превышать линейные размеры электрометрического зонда, осуществляющего регистрацию изменений потенциала поверхности полупроводниковой пластины, т.е. при диаметре зонда 1 мм составлять 3-5 мм. Для исключения затенения области измерений чувствительный элемент зонда следует выполнять в виде сетки. Частота модуляции оптического излучения должна находиться в пределах от 10 до 20 Гц, что позволяет исключить влияние переходных процессов на результаты измерений.

Предлагаемая принципиальная схема бесконтактной неразрушающей регистрации изменений потенциала поверхности полупроводниковой пластины и его пространственного распределения при воздействии модулированным оптическим излучением в режиме постоянной интенсивности оптического излучения показана на рисунке 1. Схема предусматривает использование нескольких (не менее двух)

источников монохроматического оптического излучения на основе светодиодов либо полупроводниковых лазеров. Все источники предварительно калибруются по плотности мощности оптического излучения для обеспечения равного значения последней. При этом установленное значение плотности мощности для всех длин волн должно находиться в пределах диапазона линейности зависимости «поверхностная фотоЭДС – плотность мощности оптического излучения», а энергия квантов должна превышать ширину запрещенной зоны исследуемого образца.

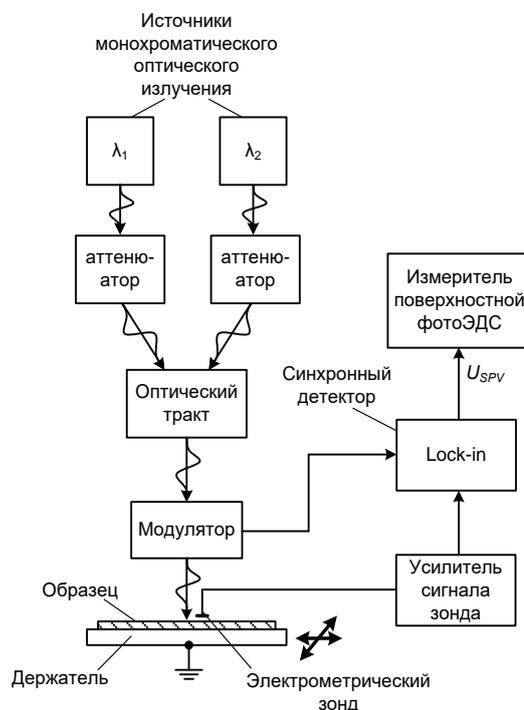


Рисунок 1 – Принципиальная схема бесконтактной неразрушающей регистрации изменений потенциала поверхности полупроводниковой пластины и его пространственного распределения при воздействии модулированным оптическим излучением в режиме постоянной интенсивности оптического излучения

Непосредственно измерения сигнала поверхностной фотоЭДС при воздействии модулированным оптическим излучением выполняют при поочередном подключении на вход световода источников монохроматического оптического излучения, начиная от источника с наибольшей энергией квантов (наименьшей длиной волны излучения). Световод и нейтральный светофильтр (при его наличии) в процессе регистрации не заменяются. Длительность регистрации изменений потенциала поверхности при воздействии каждой длиной волны должна превышать время установления выходного сигнала электрометрического зонда (приблизительно 1 с).

Результаты измерений могут содержать случайные и систематические погрешности, а также грубые погрешности (промахи). Исходя из анализа разработанных физических моделей формирования сигнала поверхностной фотоЭДС полупроводниковых структур, исключение промахов и уменьшение случайных и систематических погрешностей измерения может быть выполнено на основе следующих процедур:

1) В случае, если результат измерения поверхностной фотоЭДС на большей длине волны  $U_{CPDi}$  меньше или равен результату измерения поверхностной фотоЭДС на меньшей длине волны  $U_{CPDi-1}$ , значение  $U_{CPDi}$  отбрасывается как промах.

2) Если толщина образца составляет менее 500 мкм, значения поверхностной фотоЭДС для длин волн более 1 мкм отбрасываются как содержащие неисключенные систематические погрешности, либо же измерения для данных длин волн не выполняются.

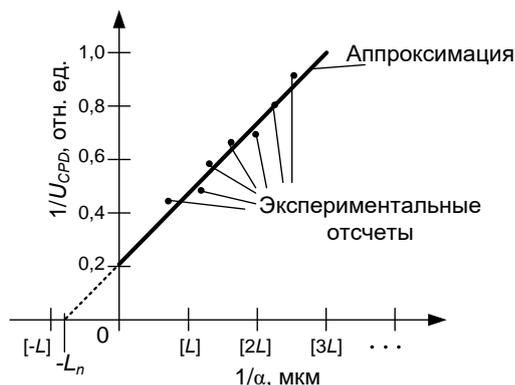


Рисунок 2 – Аппроксимация результатов регистрации изменений потенциала поверхности на графике зависимости  $1/U_{CPD}$  ( $1/\alpha$ ) (обобщенное представление)

Результаты измерений, оставшиеся после исключения погрешностей, откладываются на графике зависимости обратной величины изменения потенциала поверхности  $1/U_{CPD}$  от

обратной величины коэффициента поглощения оптического излучения кремнием на данной длине волны  $1/\alpha(\lambda)$ . Полученные экспериментальные отсчеты аппроксимируются прямой линией (рисунок 2).

Аппроксимирующий график в виде прямой линии продляют до пересечения с осью абсцисс. Координата точки пересечения численно равна длине диффузии ННЗ  $L_n$ , взятой с обратным знаком [2]. Разработанные физические модели указывают на возможность определения также и других параметров поверхности полупроводника, что может явиться предметом дополнительных исследований.

Результаты математического моделирования показали, что для типовой полупроводниковой структуры на кремнии ( $W = 0,8 \cdot 10^{-6}$  м,  $\tau_{scr0} = 10^{-6}$  с,  $\tau_{r0} = 10^{-5}$  с,  $\tau_{g0} = 10^{-3}$  с,  $s_{r0} = 10^3$  см/с,  $N_{A,epi} = 10^{15}$  см $^{-3}$ ) в пределах частот модуляции  $\omega < 3 \cdot 10^2$  с $^{-1}$  ( $f < 50$  Гц) отклик поверхностной фотоЭДС не зависит от частоты модуляции, что позволяет осуществлять измерения без стабилизации данной частоты. В то же время, алгоритмы цифровой обработки сигнала требуют анализа не менее 4 последовательных периодов переменного сигнала для определения его амплитуды. При использовании максимального значения частоты из линейной области  $f = 50$  Гц время обработки составит не менее 80 мс. В соответствии с методикой измерения, определение поверхностной фотоЭДС осуществляется путем вычитания «темнового» значения электрического потенциала поверхности из его «светового» значения, что требует измерения потенциала неосвещенной поверхности в течение приблизительно такого же времени, а при использовании двух длин волн длительность определения параметров полупроводника в одной точке должна составлять не менее 120 мс. Данное значение увеличивается прямо пропорционально количеству используемых при измерении длин волн оптического излучения и обратно пропорционально выбранной частоте модуляции.

1. ASTM F391-96. Standard Test Methods for Minority Carrier Diffusion Length in Extrinsic Semiconductors by Measurement of Steady-State Surface Photovoltage // Annual Book of ASTM Standards, April 1996. – 9 p.
2. Жарин, А. Л. Бесконтактное определение пространственного распределения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии на основе анализа спектральной зависимости поверхностной фотоЭДС / А. Л. Жарин, О. К. Гусев, А. К. Тявловский, К. Л. Тявловский, Р. И. Воробей, К. В. Пантелеев // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф., Минск, 12–13 окт. 2016 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 53-55.

УДК 681

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕДУР КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА «ФТОРДЕЗОКСИГЛЮКОЗА»

Зиновенко Е.С.,<sup>1</sup> Титович Е.В.,<sup>1</sup> Петкевич М.Н.,<sup>1</sup> Герцик О.А.,<sup>1</sup> Киселев М.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

**Цель работы:** На базе РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова с 7 октября 2015 г. работает центр позитронно-эмиссионной томографии, который включает в себя две основные структурные единицы: циклотронно-радиохимическую лабораторию и лабораторию ПЭТ-КТ диагностики.

Циклотронно-радиохимическая лаборатория оснащена циклотроном Cyclone 18/9 IBA для наработки радиоактивного изотопа F-18. На основе данного радиоизотопа синтезируется радиофармпрепарат 2-фтордезоксиглюкоза (2-[18F]-Fluorodeoxyglucose). Одним из важнейших этапов получения препарата является процедура контроля качества его физико-химических свойств. Во время проведения этой процедуры препарат имеет высокую активность, поэтому необходимо техническое обеспечение радиационной безопасности при осуществлении наработки радиоактивного изотопа F-18 персоналом лаборатории.

**Материалы и методы.** Для измерения мощности поглощенной дозы (фоновых показателей в помещении) и амбиентного эквивалента дозы используются дозиметры-радиометры МКС-АТ1117М, производства НПУП «Атомтех», а также портативные дозиметры «Атомтех» ДКС-АТ1121.

Осуществление дозиметрического контроля и обеспечение радиационной безопасности предусмотрено на всех этапах процедуры контроля качества:

- контейнер с флаконом 2-[18F]-Fluorodeoxyglucose (18-FDG) активностью в среднем 3 ГБк и объемом 2 мл, поступает в лабораторию контроля качества. На данном этапе осуществляется сверка данных наклейки с информацией о времени производства, названии, активности, срока годности препарата, находящегося в вытяжном шкафу. Измеряется мощность дозы непосредственно возле рук, на уровне груди и за спиной персонала во время работы с открытым контейнером;

- флакон помещается в дозкалибратор для измерения объемной активности и дальнейшего расчета времени полураспада;

- персонал лаборатории отбирает несколько проб из флакона для выполнения необходимых исследований: гамма-спектрометрии, тонкослойной спектрометрии (включающей нанесение вещества на специальную пластину),

проведение рН-теста, идентификация основного вещества и определение содержания примесей и токсинов с использованием газового и жидкостного хроматографов. Вследствие непосредственного контакта с препаратом персонал оснащен дозиметрами на руках и голове, что обеспечивает непрерывный контроль в соответствии с нормами и правилами радиационной безопасности.

На протяжении всех этапов синтеза радиофармацевтического лекарственного средства осуществляются непрерывные измерения радиационного фона дозиметрами-радиометрами МКС-АТ1117М, установленными в каждом помещении, задействованном в производстве, согласно проекта. Так же ведется дополнительный дозиметрический контроль портативным дозиметром ДКС-АТ1121, при выполнении каждого последующего этапа производства.

**Результаты.** Период ежедневного радиационного мониторинга в помещении лаборатории контроля качества радиофармпрепарата составил 1 месяц. В настоящее время периодический радиационный контроль проводится 1 раз в неделю. В период с 2015 по 2018 год по результатам проведенных проверок не было зафиксировано превышений контрольных уровней мощности амбиентной дозы.

**Выводы.** Радиационная безопасность персонала лаборатории при проведении контроля качества радиофармацевтического препарата 2-фтордезоксиглюкоза в РНПЦ ОМР находится на постоянном контроле, вследствие повышенной вероятности загрязнения персонала жидким радиоактивным веществом. Контроль качества радиофармацевтического лекарственного средства требует точности и сосредоточенности персонала, при необходимости минимизации временных затрат на проведение данной процедуры.

1. Тарутин, И. Г. Радиационная защита в лучевой терапии /И. Г. Тарутин, Е. В. Титович, Г. В. Гацкевич. – Минск : Беларуская навука, 2015. – 212 с.
2. АТОМТЕХ | Приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля [Электронный ресурс] : приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля. – Минск., 2017. – URL: <http://www.atomtex.com/ru>.

3. Радионуклидная диагностика для практических врачей / под ред. Ю.Б. Лишманова, В.И. Чернова. – Томск, 2004.

4. Позитронная эмиссионная томография: руководство для врачей / под ред. А.М. Гранова и Л.А. Тютин. – СПб.: Фолиант, 2008. – 368 с.

УДК 681

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ГАММА-ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ И БРАХИТЕРАПИИ В ГУ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОНКОЛОГИИ И МЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЛОГИИ ИМ. Н.Н.АЛЕКСАНДРОВА»**

**Козловский Д.И.<sup>1</sup>, Титович Е.В.<sup>1</sup>, Тарутин И.Г.<sup>1</sup>, Петкевич М.Н.<sup>1</sup>, Герцик О.А.<sup>1</sup>, Киселев М.Г.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Цель работы.** В настоящее время в РНПЦ ОМР им. Н.Н.Александрова эксплуатируется один аппарат для дистанционной лучевой терапии с источником <sup>60</sup>Co и 4 брахитерапевтических аппарата с источником <sup>192</sup>Ir. Для обеспечения сохранности и безопасной эксплуатации источников ионизирующего излучения (далее – источник) требуется разработка и внедрение методов контроля радиационного фона в помещениях с источниками, а также средств безопасности.

**Материалы и методы:** Для обеспечения радиационного контроля в помещениях с источником используется дозиметр MC-AT1125 производства "Атомтех", РБ. Контроль проводится до начала и после окончания работ с источниками ежедневно для каждого аппарата. Места проведения измерений – в непосредственной близости к источнику, на расстоянии 1 метр от источника и в центре процедурного помещения. Измерения проводятся службой радиационной безопасности с целью контроля наличия источника, а также выявления различных нарушений радиационной защиты. Для контроля за состоянием источника в течении рабочего дня используется измеритель-сигнализатор СРК-АТ2327. Световая сигнализация расположена перед входом в помещение с источником и в самом помещении. Показания прибора выводятся на пульт управления, который расположен перед входной дверью в помещение с источником.

Для обеспечения безопасности источников после окончания работ используются системы видеонаблюдения, дополнительный измеритель-сигнализатор с детектором, расположенном на выходе из помещения с источником, а также рамка металл детектора. Системы видеонаблюдения расположены в помещениях с источником, а также в смежных помещениях, и обеспечивают наблюдение за всеми выходами из помещений с источником. Изображения выводятся на монитор, расположенный на посту охраны Центра. Запись с видеокамер хранится в

течение 30 дней. Дополнительный измеритель-сигнализатор с детектором, расположенном на выходе из помещения с источником, позволяет обнаружить превышение радиационного фона в смежном помещении. Показания прибора выводятся на пульт управления, который расположен на посту охраны РНПЦ ОМР им. Н.Н.Александрова. Рамка металл детектора позволяет исключить вынос из помещения источника в защитном контейнере. Показания рамки металл детектора также выводятся на пост охраны Центра.

**Результаты.** Использование системы радиационного контроля на базе измерителя-сигнализатора СРК-АТ2327, а также обеспечение радиационного контроля с использованием дозиметра MC-AT1125 позволяет осуществить постоянный радиационный контроль над источниками в течении рабочего дня. Использование системы видеонаблюдения, дополнительного измерителя-сигнализатора с детектором, расположенном на выходе из помещения с источником, а также рамки металлодетектора позволяет исключить доступ и источнику вне рабочего времени.

**Выводы.** Системы и методы радиационного контроля в помещениях с источниками, а также технические средства безопасности позволили обеспечить требуемый законодательством РБ и международными рекомендациями уровень контроля за радиационной обстановкой в помещениях с источниками, а также повысить уровень физической безопасности закрытых источников ионизирующего излучения и исключить возможность несанкционированного использования источников для целей не связанных с оказанием медицинской помощи онкологическим пациентам.

1. Санитарные нормы и правила: СНИП №213. Требования к радиационной безопасности. – Минск, 2012.–37с.
2. Постановление МЧС, МВД, КГБ № 31/142/2. Об утверждении и введении в действие технического

кодекса установившейся практики, правила физической защиты источников ионизирующего излучения. – Минск, 2012. – 17с.

3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности, промежуточное издание МАГАТЭ, вена, 2011.

УДК 681.2.08

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ДАТАЛОГГЕР-САМОПИСЕЦ

Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Регистрация медленно изменяющихся во времени физических величин является одной из распространенных задач при выполнении различного рода длительных испытаний, проведении длительных технологических процессов в производстве или научных исследований. Существующие аналоговые самописцы обладают рядом существенных недостатков, таких как: большие размеры, сложность конструкции, низкая надежность, наличие расходных материалов, трудность извлечения и обработки полученных результатов, высокая стоимость. Существующие цифровые самописцы обладают высокой стоимостью и не всегда являются универсальными [1].



Рисунок 1 – Универсальный цифровой даталоггер-самописец

Появление на рынке дешевых 32 разрядных микроконтроллеров STM32 с ядром Cortex позволило разработать универсальный цифровой даталоггер-самописец (рисунок 1) с минимальным числом компонентов, обладающий следующими достоинствами: простота конструкции, надежность, простота эксплуатации, низкая стоимость [2]. Основные параметры: количество аналоговых входов – 5, разрядность аналого-цифрового преобразователя – 12 бит, диапазон входного напряжения 0–3,3 В, напряжение питания – одно на выбор: 3,3 В, 5 В или 7–18 В, интервал регистрации – от 1 с до 1 суток, максимальное число записей –  $15 \cdot 10^6$ . Таким образом, универсальный цифровой даталоггер-самописец позволяет непрерывно с интервалом в 1 с регистрировать 5 сигналов в течение 6

месяцев. Также использование встроенных в микроконтроллер и имеющих отдельное питание часов реального времени позволяет записывать дату и время записи регистрируемых сигналов [3]. Кроме того предусмотрено три режима работы: наладочный режим, режим самописца, режим даталоггера. Наладочный режим позволяет произвести настройку даты, времени и интервала записи, а также проанализировать значения измеряемых сигналов (без записи, только индикация на дисплее). Режим самописца позволяет записывать значения входных сигналов и индцировать на дисплее. В режиме даталоггера производится только запись значений сигналов в память, однако при этом достигается наименьшее потребление (во время записи – 50 мА, во время отсчета интервала времени – 4 мкА).

17.08.2017	14:04:43	-	25	14400	1509	2042	1435	1254	1294
17.08.2017	14:14:43	-	26	15000	1469	2037	1424	1222	1273
17.08.2017	14:24:43	-	27	15600	1473	2028	1398	1238	1263
17.08.2017	14:34:43	-	28	16200	1578	2021	1469	1414	1473
17.08.2017	14:44:43	-	29	16800	1640	2019	1564	1502	1556
17.08.2017	14:54:43	-	30	17400	1709	2018	1646	1611	1677
17.08.2017	15:04:43	-	31	18000	1459	2015	1494	1268	1226
17.08.2017	15:14:43	-	32	18600	1569	2010	1513	1415	1438
17.08.2017	15:24:43	-	33	19200	1701	2006	1564	1614	1605
17.08.2017	15:34:43	-	34	19800	1534	2003	1552	1383	1304
17.08.2017	15:44:43	-	35	20400	1619	1998	1596	1496	1542
17.08.2017	15:54:43	-	36	21000	1549	1993	1547	1370	1358
17.08.2017	16:04:43	-	37	21600	1530	1988	1578	1354	1371
17.08.2017	16:14:43	-	38	22200	1538	1986	1627	1365	1519
17.08.2017	16:24:43	-	39	22800	1556	1982	1637	1475	1592
17.08.2017	16:34:43	-	40	23400	1619	1980	1668	1525	1626
17.08.2017	16:44:43	-	41	24000	1616	1981	1682	1465	1541
17.08.2017	16:54:43	-	42	24600	1667	1981	1661	1490	1427
17.08.2017	17:04:43	-	43	25200	1744	1985	1665	1582	1627
17.08.2017	17:14:43	-	44	25800	1781	1990	1696	1592	1604

Рисунок 2 – Пример записи в текстовый файл.

Слева на право: дата, время, порядковый номер записи, время от начала процесса записи (секунды), значения пяти регистрируемых сигналов

Особенностью универсального цифрового даталоггера-самописца является то, что результаты измерений записываются на карту памяти типа SD или micro-SD с файловой системой FAT32 в текстовый файл с расширением txt. Это позволяет легко обработать результаты на любом компьютере независимо от программного обеспечения. Пример записи в текстовый файл представлен на рисунке 2. Также предусмотрена защита данных в случае аварийного отключения питания, а также возобновление работы при повторной подаче питания, что обеспечивает полную автономность работы.

Основные узлы универсального цифрового даталоггера-самописца представлены на

рисунке 3. Главным узлом является микроконтроллер (МК) имеющий в своем составе 12 разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и часы реального времени (ЧРВ). В качестве индикатора используется графический жидкокристаллический индикатор разрешением 84x48 точек. Хранение информации осуществляется на карте памяти (КП). Питание осуществляется непосредственно от внешнего источника (СН), позволяющий питать схему напряжением 5 В или 7–18 В.

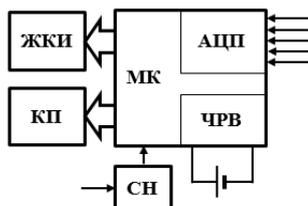


Рисунок 3 – Упрощенная функциональная схема: ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; КП – карта памяти; МК – микроконтроллер; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЧРВ – часы реального времени; СН – стабилизатор напряжения

Область применения универсального цифрового даталоггера-самописца довольно обширна и зависит от применения тех или иных первичных измерительных преобразователей, а также цепей нормирования сигналов. Поэтому измеряемыми величинами могут быть напряжение, ток, сопротивление, температура, давление и др.

Испытания универсального цифрового даталоггера-самописца проведены в полевых условиях при измерении температуры в теплице в 5 различных точках в течение трех недель. В качестве датчиков использовались полупроводниковые терморезисторы, которые были подключены по схеме резистивного делителя напряжения. Питание осуществлялось от аккумуляторной батареи напряжением 12 В. Температура окружающей среды составляла от +10 °С до +35 °С в зависимости от времени суток. Полученные результаты были перенесены на персональный компьютер и обработаны в табличном процессоре (был проведен пересчет

значений аналого-цифрового преобразователя в значения температуры). Полученные графики изменения температуры в объеме теплицы и температуры грунта в течение суток представлены на рисунках 4 и 5 соответственно. Результаты испытаний показывают работоспособность универсального цифрового даталоггера-самописца в течение длительного времени при колебаниях температуры окружающей среды.

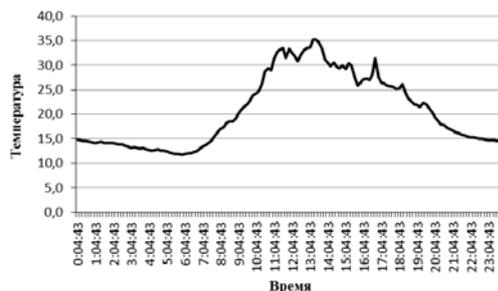


Рисунок 4 – График изменения температуры в объеме теплицы в течение суток

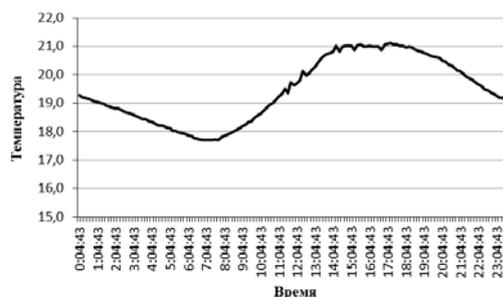


Рисунок 5 – График изменения температуры грунта в течение суток

Применение в дальнейшем универсального цифрового даталоггера-самописца облегчит исследование медленно протекающих процессов, а также ускорит обработку полученных результатов.

1. DataLoggers [Электронный ресурс] / National Instruments., 2017.
2. Микроконтроллеры STM32 «с нуля» [Электронный ресурс] / Compel.ru., 2017.
3. STM32f1-series [Электронный ресурс] / STMicroelectronics., 2017.

УДК 664

## КОМПЛЕКС АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭКСТРАКТА САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

Габец В.Л.<sup>1</sup>, Зубеня А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Скидельский сахарный комбинат»

Минск, Республика Беларусь

В производственной лаборатории ОАО «Скидельский сахарный комбинат» установлена автоматизированная система для оптимизации лабораторных анализов, который работает по актуальным стандартам Международной

Комиссии по Единым Методам Анализа Сахара (ICUMSA) [1].

Система осуществляет весь спектр анализов (сырье, промежуточные и конечные продукты) для сахарного производства, а именно - анализ

сырых, промежуточных и конечных продуктов сахарной промышленности на поляризацию;  $Brix$ ; кажущуюся чистоту; опционально на pH; проводимость золь; цвет раствора, влажность сахара и отражённый цвет.

Автоматизированная система включает комплекс автоматического контроля с вычислительным устройством для анализа сахарной свеклы на сахарозу (Z), калий (K), натрий (Na) и альфа-аминокислотный азот.

Комплекс автоматического контроля (рис.1) состоит из узла управления, автоматического сахариметра, цифрового пламенного фотометра, тестамина-фотометра, насоса перистальтического дозирования пятиканального, магнитного вентиля и персонального компьютера.

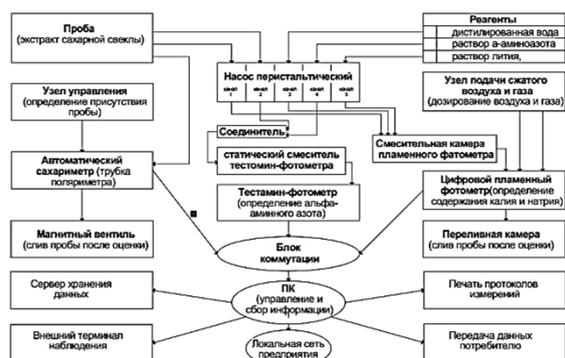


Рисунок 1 – Структурная схема и основные функции комплекса автоматического контроля качества экстракта сахарной свеклы

Автоматический сахариметр определяет содержание сахарозы (поляризация Z). Пробы для измерения наливаются в воронку проточной трубки поляриметра из нержавеющей стали, длиной 200 мм, сток которой контролируется через магнитный вентиль.

Цифровой пламенный фотометр определяет содержание калия (K) и натрия (Na) в экстракте сахарной свеклы.

Тестамина-фотометр вместе с дозировочным насосом и узлом управления помещен в один корпус и служит для определения состава альфа-аминокислотного азота по методу синих чисел с использованием медного реагента.

Программа компьютера содержит эмпирическую формулу, которая определяет из соотношения измеренного значения к значению воды - состав Амино-N. Для калибровки Амино-N, кроме этого, применяется испытательный раствор.

Калибровка в установленном порядке проводится программой компьютера путем соответствующих указаний на дисплее к работнику. Вследствие того, что реагент меди имеет гораздо большую плотность, чем проба, необходим статический смеситель, для однородного перемешивания пробы и реагента, которые в одинаковых объемах поступают от

дозировочного насоса. Для каждого анализа требуется около 13 мл реагента.

Для дозирования проб и реагентов служит перистальтический пятиканальный насос. На передней панели дозировочного узла находятся рукоятки управления, которые задают режим работы насоса и магнитного вентиля, связанного со стоком трубки поляриметра.

При промывании или при контроле функций можно вручную включить и выключить насос или магнитный вентиль. В процессе работы управление производится компьютерной программой.

Узел управления определяет с помощью зонда, который опускается в воронку трубки поляриметра, электрическую проводимость, т.е. присутствие пробы. Как только компьютер примет сигнал «проба имеется», программа управляет дальнейшим ходом анализа в соответствии с установленным алгоритмом.

Команды управления передаются от компьютера на узел управления. Там находятся бесконтактные полупроводниковые переключатели, которые включают и выключают дозировочный насос или магнитный вентиль.

Магнитный вентиль связан со стоком трубки поляриметра. Он находится на опоре под рабочим столом. Его трубчатое соединение выводится вверх, через поверхность стола, к трубке поляриметра.

Магнитный вентиль управляется узлом управления, через компьютерную программу, или вручную, поворотной рукояткой. В выключенном положении вентиль перекрыт, и налитая жидкость находится в воронке трубки поляриметра. Во включенном состоянии магнитный вентиль открывается, и жидкость течет из воронки в трубку поляриметра, избыточный объем поступает в сток.

Для управления системой, задания кода проб, охватываемых анализирующими приборами показываемых данных замеров, переработки этих данных и регистрации результатов применяется персональный компьютер.

Для протоколирования кода проб, значений анализа Z, сахарной свеклы K, Na, и Амино-N, а также рассчитанных значений качества, например, щелочности, обогащенного (кристаллизованного) состава сахара, паточного сахара, добычи сахара применяется принтер.

Процедура анализа экстракта сахарной свеклы следующая. В начале каждого цикла анализа, пробу заливают в подающую воронку трубки поляриметра, выход которой закрыт магнитным вентилем. Как только объем пробы достаточен, жидкость достигает контакта детектора - включается дозировочный насос. Насос отбирает нужный объем пробы и литиевого раствора, разбавляет дистиллированной водой и подает смесь к пламенному фотометру. Во вторую часть

пробы добавляется медный реагент, и смесь подается к тестамин-фотометру. Идентификатор пробы вводится либо с клавиатуры, либо считывающим устройством по штрих-коду. Далее проба подается в трубку сахариметра-поляриметра. Все значения с приборов считываются компьютером, и далее автоматически производится расчет качественных показателей.

УДК 614.842

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ПОДОБИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Мисюкевич Н.С.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Установившийся подход к решению задач тепломассопереноса заключается в последовательном решении ряда задач. В частности, задачи теплопроводности и теплоотдачи для изолированного проводника, состоящего из твердых материалов, окруженного газовой средой. Система уравнений, описывающая процесс, получается громоздкая и содержит много параметров, которые изменяются в реальных условиях, что увеличивает неопределенность конечного результата. Для описания различных технологических процессов часто используются эмпирические формулы, которые имеют ограниченную область применения со строго заданными условиями.

Для решения задач подобного рода применен метод разделения общей задачи на составные части для описания процесса, его анализа и последующего синтеза результата. Выделена часть задачи, которая может решаться с использованием фундаментальных законов. В данном контексте использован подход, аналогичный подходу для газовых сред: идеальные и реальные газы.

На первом этапе введено понятие идеальной (нереальной) среды, для которой действуют фундаментальные законы. Окружающая среда принята бесконечной с коэффициентом теплопроводности, соответствующим свойствам материалов стенки, через которую идет теплопередача. Это позволяет решить задачу теплопроводности и определить значение температуры на удалении от источника тепла, соответствующем границе раздела твердой и газовой среды. На втором этапе рассмотрен вопрос изменения условий среды на границе раздела для перехода к реальному процессу. Определен критерий состояния окружающей среды:

$$Mi = \frac{\beta}{\lambda \cdot l}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент теплопередачи через стенку, Вт·м<sup>2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $l$  – характеристический размер, м.

УДК 621.397 (075.)

1. Автоматизированная система оценки качества сахарной свеклы / В.Л. Габец, А.А. Зубеня // Приборостроение: материалы 9-й Международной научно-технической конференции. – Минск, 2016. – С. 163–165.

На третьем этапе проведен синтез полученных результатов двух этапов и установлены закономерности изменения температуры с учетом геометрических размеров теплопроводящего материала и состояния окружающей среды. Это позволило моделировать процесс при изменяющихся параметрах теплопроводящего материала и температуры на обогреваемой поверхности.

Определены соотношения с критериями подобия для сравнения результатов экспериментов и моделирования по различным методикам.

При рассмотрении условий естественной или вынужденной конвекции в тонком пограничном слое жидкости или газа у поверхности стенки используется критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к жидкости или газу (или наоборот), Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>.

Состояние окружающей среды при известном числе Нуссельта выражается соотношением, связывая теплофизические характеристики стенки и среды

$$Mi = \frac{\alpha \cdot \beta}{Nu \cdot \lambda^2}. \quad (3)$$

Для случая однослойной цилиндрической стенки

$$Mi = \frac{\alpha \cdot R_H}{\alpha \cdot R_B \cdot R_H \cdot \ln(R_H / R_B) + \lambda \cdot R_H}, \quad (4)$$

где  $R_H$  – наружный радиус стенки, м;  $R_B$  – внутренний радиус стенки, м.

Применительно к одножильным электрически проводам

$$Mi = \frac{\alpha \cdot R_n}{\alpha \cdot R_{жс} \cdot R_n \cdot \ln(R_n / R_{жс}) + \lambda \cdot R_n}, \quad (5)$$

где  $R_n$  – радиус провода, м;  $R_{жс}$  – радиус жилы, м.

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ОХРАННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

**Воробей Р.И., Пантелеев К.В., Тявловский К.Л., Адамович А.Р., Дробуш Ю.И.**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Республика Беларусь*

Системы телевизионного охранного телевидения (СОТ, СТВН или *CCTV* (англ. *Closed Circuit Television*)) осуществляют процесс визуального контроля или автоматического анализа изображений (автоматическое распознавание лиц, государственных номеров), записи и хранения видеоизображений событий на объекте охраны. В силу возможности регистрации и анализа не только события преступления или чрезвычайного происшествия, но также событий до и после него, применение СОТ способствует раскрытию преступлений или расследованию причин чрезвычайных происшествий, и, в ряде случаев, их предупреждению. СОТ совместно с системами пожарной и охранной сигнализации, системами контроля управления доступом образуют интегрированные высокоэффективные комплексы обеспечения безопасности объектов, персонала и посетителей. Таким образом отрасль охранного телевидения имеет непосредственное отношение к безопасности государства и общества, способствует расследованию преступлений.

Эффективное проектирование систем охранного телевидения невозможно без знания основных принципов их построения и функционирования. Непрофессионалу сложно выбрать оптимальное решение для организации видеонаблюдения, которое бы эффективно решало те проблемы, для устранения которых планируется внедрение СОТ. Современные средства СОТ позволяют визуально контролировать объект в различных условиях: при разном уровне освещенности объекта, в том числе в полной темноте (для зрения человека); на различном расстоянии; скрытно; автоматически обнаруживать перемещение на защищаемом объекте и многое другое. Охранное видеонаблюдение чаще всего не предотвращает совершение фиксируемых им правонарушений; оно эффективно решает розыскные задачи, когда на основе анализа архива можно понять, что происходило в тот или иной момент на охраняемом объекте. Систему видеонаблюдения можно рассматривать как эффективный способ раннего выявления угроз при помощи обнаружения людей, объектов, их перемещений в поле зрения камер наблюдения.

В каждом конкретном случае даже для объектов одного типа потенциальные угрозы могут различаться, поэтому постановка задач должна проводиться с учетом индивидуальных особенностей. Наиболее распространены

следующие концепции: построение систем контроля, разграничения доступа, предотвращение несанкционированного доступа в рабочие или жилые помещения, контроль за территорией предприятий, офисных учреждений, мест массового скопления людей, спортивных сооружений, вокзалов, аэропортов, коттеджных и дачных поселков. Выбор оборудования для того или иного объекта осуществляется с учетом задач, выполняемых средствами СОТ. Важная особенность систем охранного телевидения – уникальность проекта любой видеосистемы. В различных реализациях имеется много сходного (повторяющегося), но каждый новый проект СОТ – это иная конфигурация и другая совокупность задач системы. Типовые объекты охраны и целевые системы охранного телевидения весьма разнообразны и фактически охватывают все области деятельности и объекты собственности как государства, так и частных лиц.

В каждом конкретном случае особенности объекта и условий наблюдения существенно влияют на порядок и способы решения различных вопросов. Часть этапов разработки системы охранного телевидения взаимосвязаны. Кроме того, процесс проектирования часто имеет итерационный характер, с последовательным уточнением состава системы и параметров ее элементов, возвращением к уже выполненным этапам с целью их корректировки.

Проектирование систем охранного телевидения связано с рядом специфических особенностей, отличающих процессы проектирования и эксплуатации СОТ от других технических систем обеспечения безопасности. Например, невозможно сформулировать технические требования к оператору СОТ (какого именно роста или веса нарушителей он обязан обнаруживать, на каком точно расстоянии уметь их различать и т.п.); также невозможно проверить выполнение указанных требований, моделируя ситуацию на объекте, поскольку на решение охранника в конкретный момент оказывает влияние большое число трудно учитываемых факторов. Таким образом, наличие человека, как обязательного звена в СОТ, не позволяет сформулировать технические требования к системе охранного телевидения в целом.

Сегментами, развитие которых будет подталкивать общий рост рынка СТВН, являются цифровые и гибридные системы, мобильное видеонаблюдение и удаленный

мониторинг. Одним из направлений развития СТВН является оснащение ими транспортных средств.

Учебный проект СОТ выполняется индивидуально или небольшой группой (творческим коллективом) обучающихся, т.е. специалистами невысокой квалификации, за относительно короткий промежуток времени, поэтому не следует выбирать в качестве объекта охраны сложные и протяженные объекты, требующие большого объема аппаратных средств, объекты повышенной категоричности и т. п. Основным результатом выполнения учебного проекта СОТ являются чертежи, результаты моделирования параметров зон наблюдения, таблицы. Рекомендуемыми чертежами учебного проекта СОТ [1] являются:

- Архитектурный план объекта охраны, совмещенный со схемой размещения видеокамер и зон обзора;
- Схема формирования зон наблюдения в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
- Электрическая схема соединения элементов системы охранного телевидения;
- Схема размещения оборудования на посту охраны;
- Схема размещения видеоизображений зон наблюдения на мониторах;
- Алгоритм работы СОТ, учитывающий дежурный режим, обнаружение нарушителя, неисправность оборудования и т. д.

Выполнение проекта предваряется разработкой технического задания. В техническом задании (ТЗ) указываются основные физические характеристики объекта, расписание работы, состав работников, определяются задачи СОТ, режимы работы СОТ и записи видеоизображений и т. д.

Определение важности объекта – это первый основной и юридически обоснованный шаг в направлении обеспечения безопасности объектов при проектировании систем охранного телевидения. Характеризация особенностей объекта, существенных при проектировании СОТ: физические характеристики объекта, состав персонала, график работы персонала и график посещения объекта посетителями, ориентация объекта по сторонам света, особенности естественного и искусственного освещения. Важной составляющей проекта является определение вероятностей угроз, основных целей и задач системы охранного телевидения, составление модели нарушителя. При анализе угроз и разработке сценария нарушений рекомендуется использовать методику персонажей. Исходя из анализа характеристик объекта, моделей нарушителей и возможных актов саботажа персонала,

окончательно формулируются назначение и цели разрабатываемой системы.

Отметим, что при проектировании СОТ необходим учет другого состава влияющих факторов, нежели при разработке систем охранной или пожарной сигнализации. Например, при анализе архитектурного плана необходимо учесть наличие кустов и деревьев, изменение тени от их листьев в зависимости от сезона (зимой листья нет, летом она может создать оптическую преграду, причем ветви некоторых кустов могут значительно, на 1-2 метра, отрасти за один сезон). Структура покрытия и цвет стен могут влиять на требуемую чувствительность видеокамер (темные матовые стены или светлые глянцевые), необходимость применения фильтров (поляризационный фильтр для устранения бликов). При этом надо учесть, как первичные источники освещения (естественные и искусственные), так и вторичные, с учетом возможных изменений в процессе эксплуатации в течение суток и в разное время года.

Важной особенностью учебных проектов систем охранного телевидения является наличие большого числа ошибок и принятие неправильных решений обучающимся, особенно на первых этапах проектирования. При этом большинство ошибок являются типовыми, например, не учет ориентации зданий, окон, видеокамер относительно сторон света, что приводит к неправильной оценке условий освещения в зонах наблюдения. Частыми являются ошибки при расчете требований к пропускной способности каналов связи. Распространенной ошибкой является приравнивание числа элементов чувствительной матрицы видеокамеры и разрешающей способности видеосистемы, игнорирование различий в изображениях, формируемых ПЗС- и КМОП-сенсорами, учет при расчете зон наблюдения только геометрических факторов и игнорирование влияния на качество записываемого изображения глубины резкости объектива, формата и степени сжатия видеосигнала, влияния вертикального угла установки видеокамеры на геометрические искажения, и др. Обязательным фактором, который необходимо учитывать при проектировании СОТ является доступность и стоимость оборудования, конструктивная и электрическая совместимость элементов системы, наличие программного обеспечения.

1. Тявловский К.Л., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Тявловский А.К., Свистун А.И. Проектирование систем охранного телевидения: учебно-методическое пособие. / К.Л. Тявловский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2016. – 69 с.

УДК 534.86

## СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИФРАКЦИОННО-ВРЕМЕННОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Куц Ю.В., Лысенко Ю.Ю., Редька М.А.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
Киев, Украина

В ультразвуковой дефектоскопии (УЗД) обычно используют радиоимпульсные сигналы с гармонической несущей в диапазоне 1 – 10 МГц [1]. Информативными параметрами таких сигналов могут быть их амплитуда, фаза, частота и задержка на распространение в объекте контроля (ОК). Во время сканирования ОК ультразвуковым преобразователем эти параметры сигнала моделируются дефектами структуры или иными локальными неоднородностями физико-механических характеристик материала ОК и его геометрическими параметрами.

Для принятия решения о степени опасности дефектов необходимо решать вопросы не только их выявления, но и оценки размеров дефектов. В частности задачу определения размеров дефектов в виде трещины, которые могут возникнуть в процессе сварки, решают с помощью ультразвукового дифракционно-временного метода (метода TOFD – time of flight diffraction) [2]. На рис.1а,б изображены соответственно лучевая картина ультразвуковых колебаний в ОК с дефектом, и модель получаемых в приемнике сигналов.

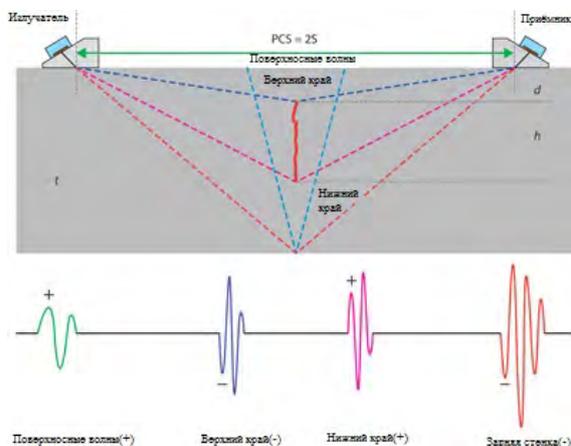


Рис. 1. Формирование информационных сигналов в системе «излучатель – ОК – приёмник» и их модель при контроле методом TOFD (по материалам [2])

Ультразвуковые колебания дифрагируют на краях трещины и дают дополнительные сигналы, расположенные во времени между излученным и донным сигналами. Причем импульсы от ближней и дальней кромок трещины различаются по начальной фазе на 180°. В этом методе контроля информационным параметром является временная задержка сигнала. Зная основные геометрические параметры системы

«излучатель – ОК – приёмник» – толщину ОК и расстояние между излучателем и приемником, а также значение скорости распространения ультразвуковых колебаний используемого типа волн, и измерив временные задержки на распространение всех сигналов в ОК можно вычислить протяженность трещины. Один из возможных алгоритмов таких вычислений приведен, например, в работе [3].

Однако обнаружение информационных сигналов в методе TOFD и соответственно оценка их временного положения затруднены вследствие низкого отношения сигнал/шум. В докладе предложено выявление сигналов УЗД на фоне значительных аддитивных шумов (при соотношении сигнал/шум единица и меньше) методом статистической фазометрии [4]. Метод основан на анализе т.н. г-статистики, известной из статистического анализа угловых величин. Отличительной особенностью этих величин является распределение их вероятностей на круге. г-статистика формируется как выборочная длина вектора, полученного в результате скользящей обработки разности фаз принятых сигналов и виртуального опорного сигнала в виде непрерывного гармонического колебания той же частоты, что и частота несущей сигналов УЗД (то есть скользящего усреднения фазовых данных при их представлении на круге единичного радиуса). г-статистика принимает значение в интервале (0, 1), а ее максимумы совпадают с максимумами сигналов УЗД, что и позволяет использовать их для измерения задержек сигналов.

Фазы принятых сигналов определяются с помощью их дискретного преобразования Гильберта (ДПГ). ДПГ реализуется во временной области как фильтр с и импульсной характеристикой [5]:

$$h(t) = \frac{1}{\pi \cdot t}$$

В докладе предложен вариант реализации системы контроля на основе метода TOFD в соединении с фазовым методом обработки сигналов. Структура системы приведена на рис.2.

В состав системы контроля входят следующие блоки:

- МК – микроконтроллер;
- ЦГ – цифровой генератор;
- ПУ – программируемый усилитель;
- VQ1 – излучатель;

- VQ2 – приёмник;
- У – усилитель;
- ФНЧ – фильтр нижних частот;
- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
- ЗУ – запоминающее устройство;
- ПК – персональный компьютер с оригинальным программным обеспечением;
- USB – интерфейс USB.

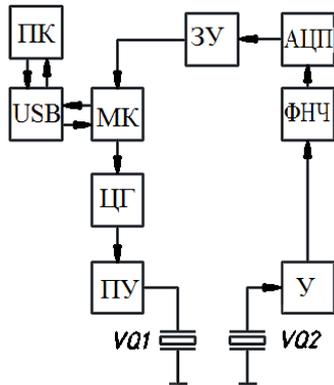


Рис. 2. Структурная схема системы контроля сварных соединений основанной на методе TOFD

Данная структура системы ультразвукового дефектоскопа отличается наличием прецизионного цифрового генератора для возбуждения колебаний в излучателе, что необходимо для корректного применения фазового метода обработки сигналов. Кроме того это позволяет реализовать прецизионный многоскальный фазовый метод измерения времени задержки сигналов. Последний основан на определении задержки в соответствии с выражением  $\tau = (2\pi n + \varphi) / \omega$ , где  $n$  – количество целых фазовых циклов,  $\varphi$  – фазовый сдвиг сигналов в интервале  $(0, 2\pi)$ ,  $\omega$  – круговая частота гармонической несущей.

УДК 681

## МОТИОН ИМПРИНТ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ СТРОГОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

Лебедев А.Н., Степанов Б.А., Нестеров М.С., Онуфриев С.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия

Современные реалии формируют новые требования к системам безопасности. Развитие методов взлома требует постоянной актуализации средств противодействия новым угрозам. Сейчас прорывается проблема, когда стандартная (парольная) аутентификация пользователя не всегда в силах обеспечить защиту от несанкционированного доступа. В таких случаях пользуются дополнительными мерами по аутентификации пользователей. Вводят усиленную аутентификацию или строгую, которая включает в себя сразу несколько факторов.

Проведенное моделирование процесса обработки сигналов УЗД подтвердило возможность их обнаружения на фоне аддитивных шумов для соотношения сигнал/шум меньше единицы. Показано, что повышение точности определения временного положения импульсов может быть достигнуто путем увеличения получаемой измерительной информации за счет увеличения частоты дискретизации сигналов в АЦП, либо применением специальных методов определения энергетических центров импульсов.

Использование методов статистической фазометрии для обработки сигналов в методе TOFD позволяет расширить функциональные возможности и область применения последнего, а также уменьшить погрешность определения временных задержек сигналов и за счет этого повысить достоверность контроля размеров дефектов.

1. R. Halmshaw. Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints. – Printed by Lightning source, Milton Keynes, England. – 2006. – 84 с.
2. Ультразвуковой дифракционно-временной метод контроля (TOFD) стыковых сварных соединений труб из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.olympus-ims.com/ru/applications/ultrasonic-tofd-butt-fusion/>
3. An overview TOFD method and its Mathematical Model [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ndt.net/article/v05n04/mondal/mondal.htm>.
4. Куц Ю. В. Статистическая фазометрия / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак – Тернополь: Изд-во Тернополь. технического ун-та имени Ивана Пулюя, 2009. – 383 с.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

Нами была поставлена задача разработать многофакторную систему аутентификации с использованием комбинации трех факторов: уникальная информация, уникальный предмет, биометрические данные (motion data). Данная статья посвящена одному из факторов – отпечаток движений (motion imprint).

Под отпечатком движений (motion imprint) понимается совокупность индивидуальных особенностей движений рук во время набора символов на клавиатуре.

Мы предположили, что такие отпечатки имеют достаточную вариативность, чтобы можно было сделать однозначное утверждение о принадлежности отпечатка данному человеку.

Для того, чтобы сделать первоначальные выводы, мы разработали ряд программ и провели несколько экспериментов.

В качестве источника motion data служат умные часы Huawei Watch (1<sup>st</sup> gen) на базе операционной системы Android Wear. Для них была написана программа, опрашивающая сенсор движения и записывающая полученные данные в текстовый файл с содержанием времени, и соответствующие мгновенные значения осей акселерометра и гироскопа. Параллельно с этим написан простейший кейлоггер на библиотеке jQuery. Кейлоггер ведет запись текущего времени, событий нажатия и отжатия кнопок клавиатуры.

В самом эксперименте участвовало четыре человека. Каждый из них надевал умные часы и вводил одну и ту же парольную фразу на компьютере по 20 раз. По окончании проведения экспериментов были получены логи с умных часов и кейлоггера. Синхронизировав время между показаниями, мы смогли отрезать показания, не относящиеся к эксперименту.

Таким образом, суммируя, было получено 480 дискретных функций для всех осей сенсора. Их них были отфильтрованы неудачные попытки ввода пароля.

Каждая из функций содержит 250-350 отсчетов, что зависит от времени набора парольной фразы.

Далее был проведен краткий анализ полученных данных. Для проведения анализа использовалась функция взаимной корреляции.

Так мы рассчитали максимум взаимной корреляции между попытками ввода парольной фразы одного человека и между попытками ввода пароля разных людей.

На рисунке 3 показаны результаты взаимной корреляции двух попыток одного человека. Здесь каждой из осей акселерометра и гироскопа соответствует 6 функций взаимной корреляции. Максимумы функций имеют следующие значения:

- $\max(\text{cor}) A_x = 0,92;$
- $\max(\text{cor}) A_y = 0,63;$
- $\max(\text{cor}) A_z = 0,71;$
- $\max(\text{cor}) G_x = 0,55;$
- $\max(\text{cor}) G_y = 0,76;$
- $\max(\text{cor}) G_z = 0,96.$

Коэффициенты, которые наиболее близки к единице – это сигнал акселерометра по оси X и сигнал гироскопа по оси Z.

На рисунке 4 показаны результаты взаимной корреляции двух попыток ввода одного пароля разными людьми. Максимумы функций имеют следующие значения:

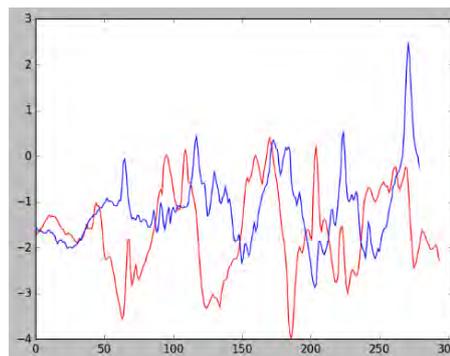


Рисунок 1 – Сигнал по оси X акселерометра попыток ввода одного пароля двумя людьми

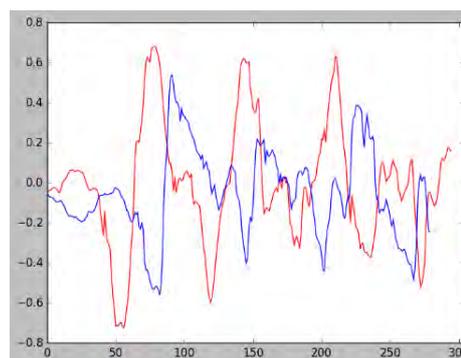


Рисунок 2 – Сигнал по оси Z гироскопа попыток ввода одного пароля двумя людьми

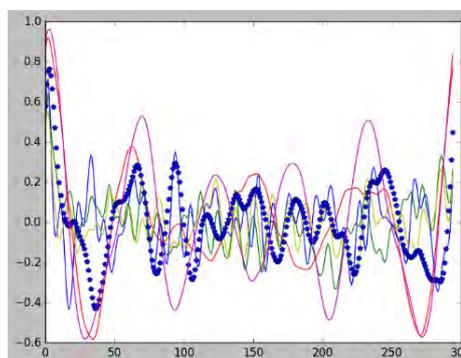


Рисунок 3 – Корреляция сигналов акселерометра и гироскопа попыток ввода одного пароля одним человеком

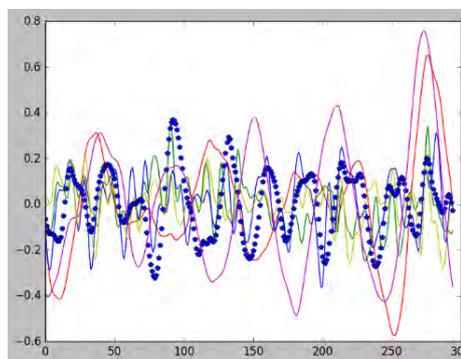


Рисунок 4 – Корреляция сигналов акселерометра и гироскопа попыток ввода одного пароля двумя людьми

$\max(\text{cor}) A_x = 0,65;$   
 $\max(\text{cor}) A_y = 0,35;$   
 $\max(\text{cor}) A_z = 0,31;$   
 $\max(\text{cor}) G_x = 0,23;$   
 $\max(\text{cor}) G_y = 0,37;$   
 $\max(\text{cor}) G_z = 0,76.$

Можно заметить, что некоторые коэффициенты уменьшились более в чем два раза. Также примечательно, что в некоторых случаях оси  $A_x$  и  $G_z$  также показывали значения корреляции порядка 0.7, что близко к значениям,

полученным при сравнении попыток одного человека. Однако остальные оси  $A_y$ ,  $A_z$ ,  $G_x$ ,  $G_y$  также продолжали сохранять двукратную разницу значений.

1. Лебедев А.Н., Онуфриев С.В., Степанов Б.А., Способ строгой многофакторной аутентификации. // «Безопасные информационные технологии». Сборник трудов Седьмой всероссийской научно-технической конференции / под ред. Матвеева В.А. – М.: НУК «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – С. 194–196.

УДК 004.021

## ЗАЩИТА КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОТ АТАК JACKPOTTING

Максимов Р.Л., Рафиков А.Г.

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация

**Введение.** Классическими примерами автоматизированных систем, которые стали неотъемлемой частью жизни каждого современного человека и требующие защиты от злоумышленников, являются банкоматы, платежные терминалы, терминалы самообслуживания, билетопечатающие автоматы.

Несмотря на постоянный интерес к банковскому сектору со стороны злоумышленников, представители этого бизнеса неохотно тратят дополнительные средства на дорогостоящие решения по защите банковских автоматов от атак на информацию. Если раньше практически всегда объектами атак становились клиенты банков, то в последнее время зачастую такими объектами становятся непосредственно системы банковского обслуживания и банковские автоматы (банкоматы, платежные терминалы).

Банкомат представляет особенный интерес для злоумышленников как хранилище денежных средств. Несмотря на то, что деньги хранятся в защищенном сейфе, злоумышленники находят способы добраться и до них.

Помимо радикальных методов, например, подрыва газом или кражи банкомата, имеют место и более высокотехнологичные атаки на уровне аппаратного и программного обеспечения, сетевого взаимодействия, подсистемы управления периферийным оборудованием. К ним относятся, так называемые, атаки jackpotting, одна из реализаций которых заключается в скрытом размещении внутри банкомата некоторого устройства (black box) и его непосредственном подключении к шинам или портам банковского автомата, что позволяет злоумышленнику удаленно контролировать все периферийные устройства. Это приводит к возможности анализа, перехвата и изменения команд при работе с диспенсером, что, в конечном счете, обеспечивает

беспрепятственный несанкционированный вывод денежных средств из сейфа атакуемого объекта.

Основными проблемами, при этом, являются: использование стандартных интерфейсов (USB, RS232, SDC) и незащищенных коммуникационных каналов, в частности, для связи «хост-диспенсер», отсутствие механизмов аутентификации, авторизации и регистрации действий злоумышленников во время проведения jackpotting-атаки.

Широкому распространению атак на информацию банкоматов также способствует доступная злоумышленнику документация банкоматов с описанием протоколов и формата команд управления.

Относительно простым и недорогим решением по защите банкоматов от jackpotting-атак с использованием black box, может стать устройство на базе криптоконтроллера, имеющего нановаттное энергопотребление, возможность подключения батареи резервного питания, аппаратную поддержку криптографических алгоритмов для защиты каналов информационного обмена и реализующего функции блокирования наиболее критических периферийных устройств при обнаружении кибератаки. Таким образом, «блокиратор» использует алгоритмы взаимной аутентификации модулей устройства и шифрования потока управляющих команд для обнаружения атак, защиты и снижения ущерба от них путем блокирования соответствующего модуля.

К критическим (с точки зрения безопасности) периферийным устройствам банкоматов относятся: защищенная ЕРР-клавиатура (encrypting PIN pad), устройство для чтения карт (card reader), диспенсер (dispenser) и устройство для внесения наличных денег (cash-in).

Однако разработать высокоэффективный, быстройдействующий, надежный криптографический алгоритм для решения поставленной

задачи в контексте сформулированных требований – серьезная задача.

В первую очередь проблема связана с использованием распространенных алгоритмов шифрования и со статистическими свойствами информации, используемой банкоматом в процессе работы. Суть заключается в том, что команды, при помощи которых производится управление периферийным оборудованием, диспенсером в частности, представляют собой ограниченный набор команд, а их перечень может быть получен из соответствующей документации. Следовательно, применение криптографических алгоритмов с использованием неизменного ключа шифрования будет приводить к ситуации, когда каждой одинаковой из заданных команд, будет соответствовать один и тот же шифртекст.

В некоторых случаях, с определенной долей вероятности, этого можно избежать, используя разнообразные режимы алгоритмов шифрования, но существует другая, не менее значимая в данном контексте проблема, заключающаяся в существенных дополнительных затратах вычислительных ресурсов и времени, необходимых для реализации известных (классических) криптографических алгоритмов.

Для сравнения, алгоритм DES (Data Encryption Standard) в самом схематичном виде использует начальную и финальную перестановки и 16 раундов шифрования, каждый из которых представляет собой итерационный блочный шифр Фейстеля, генерацию цикловых ключей и сложение результатов по модулю 2. Как результат (без учета перестановок и получения ключа шифрования) – около 200 операций для получения одного шифртекста и наличие достаточного объема памяти для хранения S-блоков.

Также стоит отметить, что алгоритм симметричного шифрования DES подвержен ряду известных атак (полный перебор, дифференциальный криптоанализ, линейный криптоанализ), а из-за небольшого числа возможных ключей (всего  $2^{56}$ ), появляется возможность их полного перебора на быстродействующей вычислительной технике за реальное время. Конечно, существует более стойкая реализация – Triple DES (3DES), но по очевидным причинам скорость ее работы ниже скорости работы DES более чем в три раза.

Работа алгоритма Rijndael (Advanced Encryption Standard, AES) в простейшем случае (128-битный ключ шифрования) включает в себя 10 раундов, на каждом из которых происходит четыре основных преобразования: выбор ключа итерации и побитовое сложение с элементами состояния, замена элементов матрицы состояния используя таблицу замен (S-box), сдвиг строк состояния, умножение каждого столбца полученной матрицы на матрицу особого вида. Как результат (без учета получения исходного ключа шифрования) – около 300 операций для

получения одного шифртекста и необходимость наличия достаточного объема памяти для хранения таблиц замен.

Асимметричные алгоритмы не рассматриваются по причине еще более сложных математических преобразований, по сравнению с симметричными алгоритмами, требующих более высокой вычислительной мощности и временных затрат как для аппаратной, так и программной реализации.

**Предлагаемое решение** предполагает наличие аппаратной и программной составляющих. Аппаратная часть состоит из платы расширения системного блока сервисной зоны банкомата и модуля защиты периферийных устройств, в частности диспенсера, располагаемого в сейфе банкомата. Программная часть включает разработку и реализацию алгоритма. Важно отметить, что среди дополнительно предъявляемых требований к алгоритму, в данном случае, рассматриваются: снижение вычислительных затрат, повышение быстродействия за счет уменьшения общего количества преобразований и их упрощения.

Алгоритм предполагает наличие массива ключей, который хранится на обеих сторонах устройства. Массив ключей может быть достаточно большим; размер его определяется объемом памяти. Получение сеансовых ключей производится из исходного массива с помощью генератора истинно случайных чисел, мастер-ключа, блоков преобразований  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ , генератора псевдослучайных чисел (рис. 1).

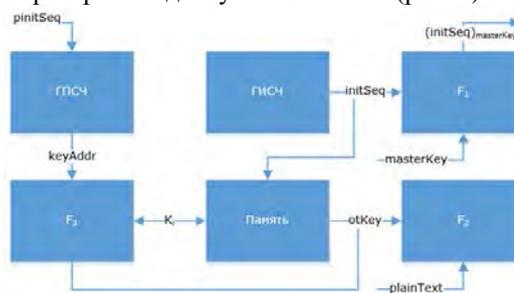


Рисунок 1 – Упрощенная схема алгоритма

На первом этапе работы алгоритма генератор истинно случайных чисел (ГИСЧ) вырабатывает последовательность `initSeq`, которая также отправляется ответной стороне, используя симметричный секретный ключ `masterKey` и преобразование  $F_1$ , и служит в качестве заполнения имеющегося объема Памяти. В обычном режиме работы из Памяти каждого модуля извлекается очередной сеансовый ключ `otKey` и используется для формирования шифртекста из открытого текста `plaintext` с помощью преобразования  $F_2$ . В качестве открытого текста может выступать, например, набор команд управления периферийными устройствами. Длина открытого текста `plaintext` всегда не превышает длину сеансового ключа `otKey`.

При истощении ключевого набора Памяти раньше, чем выполнится очередная синхронизация модулей, используется преобразование  $F_3$ , которое позволяет существенно расширить набор сеансовых ключей с небольшим понижением их криптографических характеристик и обеспечить непрерывность работы.

Цикл формирования сеансовых ключей повторяется необходимое количество раз. Обновление набора сеансовых ключей происходит аналогичным образом.

В некоторых случаях качестве преобразований  $F_1$  и  $F_2$  (в зависимости от требуемых свойств информации) может выступать одно из простейших преобразований: побитовое сложение, арифметическое сложение (по  $\text{mod } 2^n$ ), операция циклического сдвига, – или их комбинации, что позволяет существенно повысить производительность алгоритма по сравнению с известными алгоритмами шифрования и обеспечить при этом достаточную стойкость. При использовании более сложного набора преобразований стоит учитывать, что необходимый объем вычислений приводит к потере производительности всей системы в целом.

Несмотря на отсутствие у представленного алгоритма аналога S-блокам, требуется значительный объем дополнительной памяти для хранения сеансовых ключей шифрования. Однако при использовании функции расширения это можно расценивать и как преимущество, т.к. большой объем исходной ключевой последовательности позволяет значительно увеличить количество сеансовых ключей, хранящихся в Памяти.

Необходимость процедуры синхронизации возникает только в том случае, если произошел сбой в канале связи, нарушен протокол обмена, обнаружены атаки на подсистему. Благодаря сопутствующей функции взаимной аутентификации легко обнаруживаются нарушения нормального функционирования информационного обмена.

**Заключение.** Представленный алгоритм имеет малое количество операций, что повышает общее быстродействие устройства, снижает энергопотребление; позволяет синхронизировать сеансовые ключи.

УДК620.130

## ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С.

Белорусский Национальный Технический Университет  
Минск, Республика Беларусь

Контроль свойств объектов с помощью пленочных преобразователей магнитного поля и расчеты магнитных полей описаны в [1–4]. Определение удельной электропроводности и магнитной проницаемости объектов, а также их толщины и параметров дефектов в них

применение методов расширения ключевой последовательности в большинстве случаев позволит избежать преждевременной процедуры обновления набора ключей.

Предлагаемый алгоритм может служить концептуальной и логической основой для построения эффективной подсистемы защиты информации в каналах передачи и позволит эффективно распознавать и предотвращать различные кибератаки, включая jacking-атаки.

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Теория связи в секретных системах. – М.: ИЛ, 1963. – С. 333–369.
2. Жуков А.Е. Легковесная криптография. Часть 1 // Вопросы кибербезопасности. – 2015. – № 1 (9). – С. 26–43.
3. Жуков А.Е. Легковесная криптография. Часть 2 // Вопросы кибербезопасности. – 2015. – № 2 (10). – С. 2–10.
4. Островский Д.Е., Рафиков А.Г. Криптозащитенный микроконтроллер // 3-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2012.
5. Островский Д.Е., Рафиков А.Г. Генератор истинно случайных чисел // 3-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2012.
6. Rukhin A, Soto J, Nechvatal J. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. NIST special publication 800-22, 2010.
7. Сабанов А.Г. Обзор технологий идентификации и аутентификации // Документальная электросвязь. – 2006. – № 17. – С. 23–27.
8. Сабанов А.Г. Аутентификация как часть единого пространства доверия // Электросвязь. – 2012. – С. 40–44.
9. Деднев М.А., Дыльнов Д.В. и др. Защита информации в банковском деле и электронном бизнесе. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2012. – 512 с.
10. Кривченко И. Аппаратно-защищенные микросхемы семейства Crypto Authentication: потенциальные применения ATSHA204A // Компоненты и технологии. – 2015. – № 10. – С. 87–93.
11. Jan Axelson. USB Complete: The Developer's Guide (Complete Guides series). Lakeview Research, English, 2015. ISBN/ASIN: 1931448280, ISBN13: 9781931448284.
12. NIST S. Guide to Integrating Forensic Techniques into Incident Response. 2006. – P. 80–86.

осуществлено в работах авторов в импульсных магнитных полях с применением разработанных гистерезисных методов контроля [5–8]. Целью работы является повышение точности измерения магнитных полей и контроля свойств объектов путем использования численных расчетов,

проводимых предварительно, в данном случае с помощью программного языка Delphi [9].

На электропроводящий объект с приложенным к его поверхности преобразователем магнитного поля воздействовали одиночными импульсами магнитного поля различной амплитуды  $H_{0m}$  и конфигурации и определяли величину максимальной напряженности магнитного поля  $H_m$  вблизи поверхности исследуемого объекта. Импульсное магнитное поле создавали линейными, плоскими и объемными источниками.

Датчики магнитного поля изготавливали из магнитного носителя (МН). При этом использовали как сплошные, так и дискретные датчики магнитного поля (ДДМП), представляющие собой набор магнитных полос из МН, жестко укрепленных на немагнитной основе.

Воздействие на ДДМП осуществляли серией одиночных импульсов магнитного поля с чередующейся полярностью и получали на датчике распределения остаточных магнитных полей, по которым определяли свойства объектов. Информацию с ДДМП считывали индукционной магнитной головкой (МГ), на выходе которой получали зависимость  $U=U(t)$  величины электрического  $U$  напряжения от времени  $t$ .

Контролировали объекты из алюминия, меди, свинца и других металлов. В качестве МН использовали магнитные ленты разного типа, магнитооптическую пленку, магнитные флюкс детекторы и другие преобразователи магнитного поля. На ДДМП производили запись суммарной напряженности магнитного поля  $H_m$ . Путем сканирования ДДМП магнитной головкой, подключенной к входу цифрового осциллографа, находили величину индуцированного МГ напряжения, по которой в соответствии с градуировочными характеристиками МН определяли величину  $H_m$ .

Точность определения свойств объекта значительно повышали за счет применения разработанных гистерезисных методов контроля в импульсных магнитных полях. Рассчитаем величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля по линии замера, перпендикулярной оси линейного индуктора, в направлении  $x$  от проекции его оси по формуле:

$$H_l = 100(x^2 + 1). \quad (1)$$

Здесь  $x$  измеряется в  $см$ , а  $H_l$  – в  $А/см$ . Расстояние от оси излучателя до МН равно  $1 см$ . Зависимость (1) показана на рис.1 (кривая 1).

На рис.1 показано также распределение импульсного магнитного поля, вызванного локальной неоднородностью в объекте (зависимость 2).

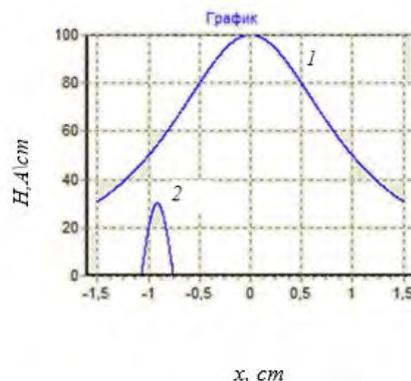


Рисунок 1 – Зависимость величины напряженности магнитного поля  $H$  от расстояния  $x$  до проекции оси излучателя

Осуществим записи поля на магнитный носитель с использованием его гистерезисной ветви. Пусть величина электрического напряжения  $U_m = U_m(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, принимает попеременно значения  $U_m = 25 мв$  и  $U_m = -25 мв$ .

Зададим интервал следования разнополярных импульсов относительно напряженности магнитного поля равный  $H_l = 5 А/см$ .

Тогда функции (1) на рис. 1 будет соответствовать штрихкодвое распределение электрического напряжения в виде прямоугольных полос, показанное на рис. 2.

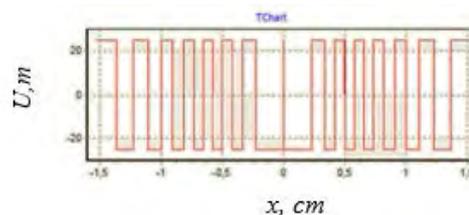


Рисунок 2 – Штрихкодвое распределение электрического напряжения

Если на каком-то участке зависимости, содержащей информацию о свойствах объекта, величина напряженности магнитного поля отличается от параметров зависимости 1, то прямоугольные участки будут сдвинуты относительно начальной зависимости. Разность штрих-кодвых линий на этих участках будет характеризовать изменение величины напряженности магнитного поля и, следовательно, параметры неоднородности объекта.

Так, штрихкодвое распределение прямоугольных полос, изображенное на рисунке 3, соответствует суммарному полю зависимостей 1 и 2 на рис. 1.

По ширине указанных штрихов и их местоположению определяют параметры неоднородных магнитных полей и параметры неоднородностей структуры в объекте. Метод

применим для магнитных, электрических и любых других полей.

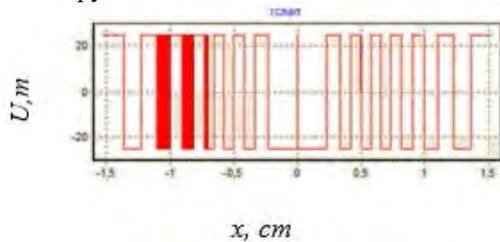


Рисунок 3 – Штрихкодированное распределение электрического напряжения

- Новиков, В.А., Кушнер, А.В., Шилов, А.В. Магнитографический контроль объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитноситель. Схемы намагничивания / В.А. Новиков, А.В. Кушнер, А.В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С.30–35
- Грузинцев, А.А., Михайлов, С.П. Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. I. Исходная модель для расчета поля магнитной ленты, намагниченной от проводника с током. / А.А. Грузинцев, С.П. Михайлов // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С.22–30.
- Суханов, Д.Я., Совпель, Е.С. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических

объектов / Д.Я. Суханов, Е.С. Совпель // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С.56-62.

- Новиков, В.А., Шилов, А.В., Кушнер, А.В. Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки “Flux-detector” / В.А. Новиков, А.В. Шилов, А.В. Кушнер // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5. – С. 18-22.
- Павлюченко, В.В., Дорошевич, Е.С. Одним импульсом / В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 174с.
- Павлюченко, В.В. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29-40.
- Павлюченко, В.В. Использование магнитного гистерезиса при контроле объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич // Дефектоскопия. – 2013. – № 6. – С. 53-68.
- Павлюченко, В.В. Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич, В.Л. Пивоваров // Дефектоскопия. – 2015. – №1. – С. 11-20.
- Фленов, М. Библия Delphi / М. Фленов, СПб: БХВ-Петербург, 2011, – 688с.

E-mail: es\_doroshevich@mail.ru

УДК 681.7.069.3

## ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

**Баранов В.В., Батурля И.В., Кузьмич А.И., Петрович В.А., Серенков В.Ю., Шахлевич Г.М.**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Методы диагностирования состояния силовых агрегатов по параметрам используемых масел базируется на том, что масла являются неотъемлемым компонентом узлов трения. Это обуславливает актуальность задачи разработки конструкции датчиков, способных контролировать эксплуатационные параметры жидких сред (масел) по зависящим от них электрофизическим характеристикам.

В настоящее время базовым подходом к созданию датчиков контроля характеристик жидких диэлектриков, в том числе масел, является использование емкостных ячеек, которые позволяют на различных частотах зондирующего сигнала получать отклик, содержащий конкретную информацию о диэлектрических потерях.

В качестве контролируемого параметра масел в настоящее время используется измерение тангенса угла потерь ( $\text{tg}\delta$ ).

Ранее нами исследованы зависимости  $\text{tg}\delta$  масла марки М14В2 с использованием конструкции конденсатора с плоскопараллельными никелевыми пластинами [1, 2].

В настоящей работе использованы дополнительно иные разновидности емкостных

датчиков (на рисунке 1 показаны в центре и справа):

– плоскопараллельный конденсатор, в качестве обкладок которого использовалась сетка с ячейкой  $1 \times 1$  мм. Сетка представляет собой стальной каркас, гальванически покрытый цинком;

– конденсатор с коаксиальными спиралевидными медными обкладками.



Рисунок 1 – Общий вид датчиков

Недостаток ранее использованного датчика – анизотропия скорости смены диэлектрической среды (масла) между сплошными обкладками в процессе измерения относительно осей координат обкладок. По осям  $X$ ,  $Y$  смена масла проблем не вызывает, а по оси  $Z$ , перпендикулярной

плоскости  $X-Y$ , замена масла затруднена. Вследствие повышенного сопротивления протекания масла, повышаются требования к жесткости конструкции датчика, а также возникает временная задержка при считывании показаний. Для снятия затруднений проточности масел по трем пространственным осям  $X-Y-Z$  существенные преимущества имеет сетчатый и в большей степени спиралевидный датчики.

Измерения  $\text{tg}\delta$  проводили с использованием прибора Е7-25, производства Республики Беларусь (МНИПИ). Прибор позволяет регистрировать значения  $\text{tg}\delta$  при величине измерительного синусоидального сигнала 700 мВ и 40 мВ, а также величины эквивалентных сопротивлений и емкостей для последовательных и параллельных вариантов их соединения.

В диапазоне частот 25 Гц – 1 кГц значения  $\text{tg}\delta$  находятся в пределах 0,25 – 0,025 и убывают с ростом частоты обратно пропорционально.

Характерно, что численные значения  $\text{tg}\delta$  для всех использованных конструкций датчиков отличаются друг от друга не более, чем на 5 %.

Полученные результаты, по нашему мнению, связаны со следующим.

В общем случае величина заряда, накопленного в конденсаторе, может быть отображена следующим образом:

$$Q = CU = \varepsilon_0 \varepsilon \int EdS. \quad (1)$$

Формальное определение величины тока в цепи отображается таким образом:

$$I = U/R = \sigma \int EdS. \quad (2)$$

Разделив (1) на (2), получим

$$RC = \varepsilon_0 \varepsilon / \sigma. \quad (3)$$

Произведение  $RC$  входит в формулу для определения величины  $\text{tg}\delta$  и, как видно из (3), никак не связано с геометрическими размерами датчиков, а определяется лишь диэлектрической проницаемостью ( $\varepsilon$ ) и электропроводимостью ( $\sigma$ ) масла. Незначительные отличия показаний датчиков связаны с краевыми эффектами, которые в вышеприведенных формулах не учитываются.

1. Батурля И.В., Кузьмич А.И., Баранов В.В., Петрович В.А., Серенков В.Ю., Завацкий С.А., Фоменко Н.К., Ковальчук Н.С. Диэлектрические характеристики моторных масел для силовых агрегатов, измеряемые емкостными датчиками // Доклады БГУИР. – 2016, № 3 (97). – С. 103–106.
2. Кузьмич А.И., Радевич Е.И., Петрович В.А., Баранов В.В., Серенков В.Ю. Датчики контроля электрофизических свойств жидких диэлектриков // МНПК «Современные информационные и электронные технологии», 22–26 мая 2017. – Одесса, Украина.

УДК 621.382

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФОТОПРИЕМНИКОМ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА

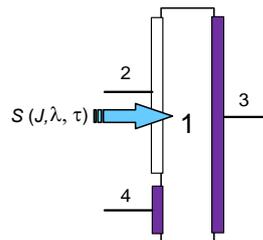
Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жуковский П.<sup>2</sup>, Опеляк М.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Буйневич М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Многие измерительные преобразователи выполняются на основе микроконтроллеров со встроенными или внешними модулями аналого-цифрового преобразования (АЦП). Системы дистанционного контроля и диагностики широко используют различные фотоэлектрические преобразователи. Многофункциональные одноэлементные фотоприемники (ФП) с двумя потенциальными барьерами [1], образованные двумя встречно включенными диодами Шоттки и разделенные длинной базой (рисунок 1), позволяют измерять не только интенсивность монохроматического оптического излучения, но и его длину волны [2, 3].

Измерение при этом производится компенсационным способом – измеряемое значение длины волны соответствует величине компенсирующего напряжения  $U_D$ , прикладываемого к фотоприемнику, по достижению условия равенства нулю выходного тока  $j$  (рисунок 2).



- 1 – полупроводник; 2 – полупрозрачный контакт Шоттки; 3 – тыльный контакт Шоттки; 4 – управляющий электрод

Рисунок 1 – Структура одноэлементного двухбарьерного фотоприемника

Общий алгоритм измерения интенсивности и длины волны оптического излучения [2], использующий компенсационные способы измерения, описан применительно к аналоговым средствам измерения. Аналого-цифровой измерительный преобразователь характеристик оптического излучения по параметрам: интенсивность и длина

волны, может быть выполнен по схеме, основой которой является микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем АЦП (рисунок 3). Нормированный сигнал для АЦП микроконтроллера МК формирует согласующее устройство СУ. Микроконтроллер, в зависимости от полярности и амплитуды выходного сигнала фотоприёмника изменяет цифровой код на входе цифро-аналогового преобразователя ЦАП.

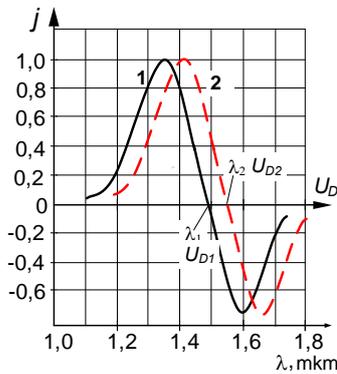


Рисунок 2 – Спектральная характеристика чувствительности двухбарьерного фотоприемника (Ni-nGe(Cu)-Ni)

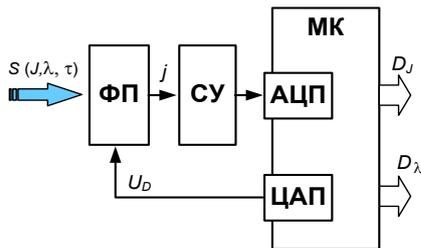


Рисунок 3 – Измерительный преобразователь с фотоприемником компенсационного типа

При достижении условия равенства нулю выходного сигнала ФП  $j$  микроконтроллер фиксирует код на входе ЦАП и передает его в порт выхода данных длины волны излучения  $D_\lambda$ . Таким образом, измерительный преобразователь формирует два выходных сигнала, соответствующих длине волны измеряемого оптического сигнала  $S$ : аналоговый – в виде величины компенсирующего напряжения  $U_D$ , и цифровой – в виде цифрового кода  $D_\lambda$ .

При использовании традиционных методик и алгоритмов измерения такой измерительный преобразователь будет иметь различное время преобразования, в зависимости от разности значений формируемых кодов: в предыдущем и текущем измерениях. При этом будут формироваться и различные периоды между отсчетами, либо период между отсчетами нужно будет выбирать по наихудшему значению.

Устранить этот недостаток позволяет использование «преобразования с предсказанием», применяемого, например, в каналах связи с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией

[4]. Применение этого метода тем эффективнее, чем сильнее корреляционные связи между близкими отсчетами, следовательно, можно точнее сформировать сигнал предсказания. При сильных корреляционных связях значение принимаемого информационного сигнала может быть предсказано по одному предыдущему отсчёту.

В этом случае измерительный преобразователь на базе МК фактически представляет собой адаптивную систему, в которой для уменьшения времени преобразования используют переменный шаг формирования входного кода для ЦАП уравнивания в зависимости от текущих статистических характеристик измерительного сигнала. Величиной шага квантования управляет микроконтроллер, который сейчас вырабатывает код для ЦАП не с нуля, а с предыдущего значения. При этом, управляющим фактором изменения кода является знак приращения.

Если измерительный сигнал не изменяется, то в подряд следующих отсчетах знак приращения  $y(k)$  постоянно меняется, код через каждый отсчет попеременно изменяется на  $\pm 1$ , выходной код в среднем остается неизменным с шумом квантования  $\pm 1$  младшего значащего разряда (МЗР). Время преобразования минимально и соответствует одному такту формирования кода для ЦАП.

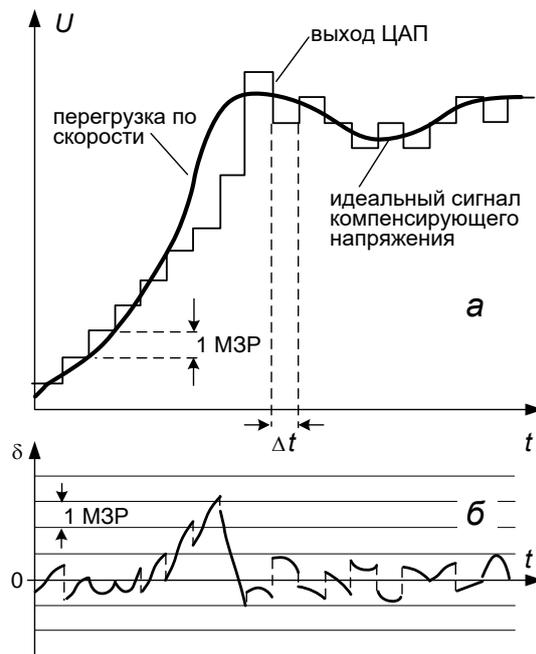


Рисунок 4 – Диаграмма работы адаптивного измерительного преобразователя компенсационного типа (а) и ошибка преобразования (б)

Если знак приращений  $y(k)$  остаётся неизменным в течение трёх- четырёх интервалов дискретизации, то это означает наличие перегрузки преобразования по скорости (рисунок 4). Микроконтроллер удваивает амплитуду импульсов. Если и в этом случае знак приращения (сигнала ошибки) не изменится, то размер шага снова

удваивается и т.д. [4]. При изменении знака приращения размер шага квантования уменьшается. Таким образом, микроконтроллер управляющий размером шага квантования должен анализировать плотность сигнала знака приращений  $y(k)$ . На выходе ЦАП при изменении коэффициента усиления в зависимости от плотности сигнала знака приращений  $y(k)$  будет формироваться ступенчатое напряжение с адаптивно изменяющимся шагом квантования. При этом, время преобразования не будет превышать нескольких интервалов дискретизации, но придется мириться с эпизодически появляющейся ошибкой до четырёх значений МЗР.

Преобразователь с фотоприемником компенсационного типа и использование «преобразования с предсказанием» характеризуется малым временем преобразования (несколько интервалов дискретизации) и шумом дискретизации около  $\pm 2$  МЗР.

Описанный измерительный преобразователь может использоваться не только с

фотоприемниками, но и с другими сенсорами, использующими компенсационные способы формирования измерительного сигнала.

1. Vorobey, R.I. / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhebtskaya, K. Kierczynski // Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range. // Przegląd elektrotechniczny, – Nr 5/2014, – Pp. 75–78.
2. Гусев, О.К. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О.К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О.К. Гусева. – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Гусев О. К., Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Свистун А. И., Шадурская Л. И. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей. // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 2. – С. 34–42.
4. Зюко, А.Г. Теория электрической связи. А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1998. – 432 с.

УДК 621.382

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПАРАТОР НА БАЗЕ ДВУХБАРЬЕРНОГО ФОТОПРИЕМНИКА С ДЛИННОЙ БАЗОЙ

Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жуковский П.<sup>2</sup>, Зданович С.В.<sup>1</sup>, Колтунович Т.<sup>2</sup>, Опеляк М.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Шадурская Л.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Оптические компараторы применяют для контроля изделий методом сравнения изображения изделия с эталонным изображением. Применяя светофильтры, ошибки разного знака можно характеризовать различными цветами, что обеспечивает повышение чувствительности, но не снижает утомляемости и не исключает субъективных оценок оператора [1]. В оптико-электронных компараторах сравниваются не собственно изображения, а сигналы, несущие информацию о наиболее важных свойствах изображения. В простейшем случае используются два фотоприёмника, сигналы с выхода которых поступают на входы обычного электронного компаратора для формирования признака равенства оптических сигналов в виде выходного электрического сигнала заданного уровня. Недостатком таких компараторов является низкое быстродействие и невозможность сравнения оптических сигналов по нескольким параметрам одновременно. Оптические компараторы, образованные связанными волноводными разветвлениями [2], характеризуются высоким быстродействием, но имеют сложную конструкцию, приводящую к оптическим потерям и также не позволяют сравнивать изображения по нескольким параметрам.

Некоторые многофункциональные одноэлементные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) [3], например, поверхностно-барьерные структуры с двумя потенциальными барьерами, сформированные с противоположных сторон приборной структуры, и образующие два встречно включенных диода Шоттки разделенных длинной базой (рисунок 1,а), демонстрируют немонотонную зависимость (рисунок 1,б) выходного сигнала от длины волны  $\lambda$ , интенсивности света  $I$ , величины приложенного напряжения  $V$  и геометрического смещения  $\Delta z$ , спроецированного изображения от фронтальной к тыльной плоскости структуры [4]. Такая структура представляет собой по существу функциональный преобразователь, в котором взаимосвязь четырех параметров  $I$ ,  $\lambda$ ,  $V$ ,  $\Delta z$  дает возможность функционального выражения одной физической величины через другую (или совокупность нескольких величин) и использования прибора в качестве фотоприемника для сравнения интенсивностей излучения в разных спектральных диапазонах, детектора длины волны монохроматического излучения и др. приема и передачи информации, координатно-чувствительного элемента.

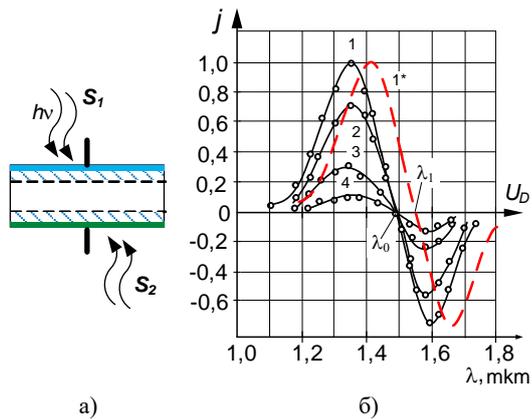


Рисунок 1 – Структура одноэлементного двухбарьерного ФЭП (а) и спектральные характеристики фототока короткого замыкания преобразователя ( $Ni-nGe(Cu)-Ni$ ) для различных плотностей мощности оптического излучения: 1 –  $J = 10$  мкВт/см<sup>2</sup>, 2 –  $J = 5$  мкВт/см<sup>2</sup>, 3 –  $J = 3$  мкВт/см<sup>2</sup>, 4 –  $J = 1,5$  мкВт/см<sup>2</sup> (б)

При освещении с одной стороны двухбарьерный ФЭП характеризуется линейной передаточной характеристикой интенсивности света  $I$  и нелинейной характеристикой чувствительности к длине волны [4] вследствие поглощения света по глубине структуры, отражения от передней и тыльной сторон структуры и т.д. Однако при освещении ФЭП с двух сторон оптическим сигналом  $S_1$  анализируемого изображения и сигналом  $S_2$  опорного изображения нелинейности передаточных характеристик взаимно компенсируются и выходной сигнал  $J$  будет равен нулю при равенстве оптических сигналов  $S_1$ ,  $S_2$  по обоим параметрам: интенсивности и длины волны света.

Если выводы на противоположных сторонах ФЭП выполнить не в виде полупрозрачных электродов на всей поверхности структуры, а в виде совокупности электродов 1–4 и 5–6, размещенных по контуру структуры (рисунок 2), то такой ФЭП будет чувствителен также к форме и положению элементов изображения относительно центра структуры [3]. Координатно-чувствительный ФЭП будет формировать нулевой выходной электрический сигнал, как ФЭП со сплошными электродами, при равенстве  $I$ ,  $\lambda$  и  $Z$ , где  $Z$  – параметры формы и местоположения изображения на чувствительной поверхности ФЭП.

Изменение смещения на парах электродов 1–2 и 3–4 до достижения условия равенства нулю выходного тока, позволит определить возможные смещения изображений, формирующих сигналы  $S_1$ ,  $S_2$  по координатам  $X$ ,  $Y$ . Изменение смещения между электродами 1–4 и 5–8 также до достижения условия равенства нулю выходного тока, позволит определить изменения максимумов в спектре излучения изображений 1 и 2 ( $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  на рисунке 1, б).

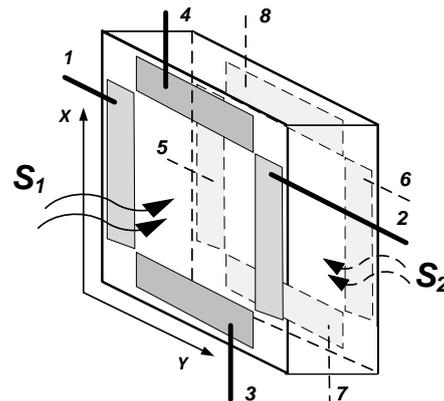


Рисунок 2 – Оптико-электронный компаратор на базе одноэлементного двухбарьерного координатно-чувствительного ФЭП

Дополнительно параметрами преобразования оптико-электронного компаратора, если в качестве основы ФЭП используется собственный полупроводник слабо легированный глубокой примесью, формирующей несколько уровней с различными зарядовыми состояниями, можно управлять, используя внешнее оптическое излучение [5]. Изменяя интенсивность излучения из области собственного поглощения можно управлять концентрацией примеси в различных зарядовых состояниях с разными уровнями энергии ионизации. В зависимости от плотности мощности оптического сигнала (дополнительного, или основного, сигналов  $S_1$ ,  $S_2$ ) реализуются различные зарядовые состояния многозарядной примеси. Основой применения управляемых структур является изменение времени жизни и подвижности неравновесных носителей заряда в результате их перераспределения по уровням рекомбинации и прилипания многозарядной примеси. Например, одноэлементная структура с расширенным и переключаемым диапазоном энергетической характеристики работает следующим образом: при изменении мощности оптического излучения происходит изменение концентрации зарядовых состояний примеси с разными энергиями ионизации и автоматическое переключение между уровнями по мере их заполненности, соответственно мощности оптического излучения. Результатом является расширение динамического диапазона чувствительности ФЭП и реализация автоматического переключения передаточной характеристики фоточувствительности. Изменение интенсивности управляющей подсветки позволяет изменять относительную чувствительность фотоприемного устройства к излучению в диапазоне длин волн  $\lambda_1 \dots \lambda_n$  из области примесного поглощения (от 1,5 до 12 мкм).

В зависимости от требуемых диапазонов чувствительности оптико-электронного компаратора по мощности и спектральному составу

сравниваемых оптических сигналов, ФЭП может быть выполнен на базе различных полупроводниковых материалов и с различной технологией формирования приборных структур. При этом реализация различных характеристик преобразования предложенного оптико-электронного компаратора производится с использованием одноэлементной полупроводниковой структуры без необходимости использования дополнительных оптических элементов.

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика (изд.2-е, доп.) – М.: Машиностроение, 2003 – 657 с.
2. Соколов С.В. Оптический компаратор Пат. РФ № 2020551 Кл. G06E3 – 1994
3. Гусев, О.К. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными

состояниями / О.К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О.К. Гусева. – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.

4. Гусев О. К., Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Свистун А. И., Шадурская Л. И. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей. // Метрология и приборостроение. – 2017, № 2. – С. 34–42
5. Фотоприемное устройство, управляемое подсветкой: патент № 15840 РБ, МПК Н 01L 31/16 / О.К. Гусев, Р.И. Воробей, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая; заявл. 03. 30. 2010; зарегистр. 26. 01. 2012
6. Vorobey, R.I. / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhebbitskaya, K. Kierczynski // Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range. // Przegląd elektrotechniczny, – No 5/2014, – Pp. 75–78.

УДК 614.1/519.25

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

**Иванов В.И., Иванов Н.И., Лазарчик А.Н.**

*НИИ ядерных проблем БГУ*

*Минск, Республика Беларусь*

Разработанные компьютерные комплексы представляют собой многофункциональную программно – аппаратную платформу для автоматизированного анализа различных изображений с использованием микроскопов, рисунок 1 и компьютерных двухкоординатных сканеров, рисунок 2 для оцифровки и обработки различных снимков и изображений материальных структур на пленках, стеклах и чипах.



Рисунок 1 – Аппаратная конфигурация комплекса с микроскопом



Рисунок 2 - Двухкоординатный компьютеризированный сканер комплекса

Программно – математическое обеспечение комплексов имеет русскоязычный интерфейс и обеспечивает выполнение следующих функций:

- Электронную сканирующую микросъемку и ввод цифровых изображений, включая микро-изображения гистологических и цитогенетических микропрепаратов, а также препаратов с флуохромно меченными ДНК – маркерами. Шаг сканирования 0,2 мкм; поле сканирования 25 x 85мм. Оцифровка изображений осуществляется цветными высоко-разрешающими цифровыми камерами (3,5–18 мегапиксел) в истинных и псевдоцветах в различных областях спектра видимого и ультрафиолетового диапазонов.

- Ввод и обработку ряда разноспектральных изображений с автоматической и ручной коррекцией сдвига исходных изображений.

- Три метода суммирования разноспектральных изображений для получения результирующего изображения: простое суммирование, суммирование фрагментов и наложение фрагментов в результирующем изображении.

- Возможность независимого изменения параметров всех разноспектральных изображений: яркости, контраста, четкости и т.д.

- Выбор произвольного цвета для псевдоокраски исходных черно - белых изображений.

- Возможность просмотра и редактирования как результирующего, так и любого исходного изображения.

- Автоматическую сегментацию изображения с выделением изолированных объектов,

автоматическую разметку и измерение параметров выделенных объектов (длин, площадей, периметров) с разрешением не хуже 0,5 мкм.

- Автоматический подсчет объектов изображения по заданным дифференциальным признакам объекта – размерам, цвету и т.п.) в заданной зоне изображения.

- Ручной или полуавтоматический режим редактирования изображений: изменение яркости и контрастности, объединение разорванных объектов, разделения слипшихся или перекрывающихся объектов.

- Архивирование электронных изображений препаратов в компьютере, создание электронных атласов и коллекций исходных изображений.

- Расчет статистических параметров объектов изображений.

Одной из важных сфер применения технологии компьютерной обработки изображений является анализ изображений гистологических и цитогенетических биопрепаратов в медицинской диагностике.

а базе данной программно – аппаратной платформы нами созданы компьютерные анализаторы изображений «ХРОМОСОМА» и «ХРОМОСОМА – FISH» медицинского назначения. Комплексы предназначены для массовых исследований в лабораторной клинической диагностике:

**1. Гистология и цитология** – анализ морфологической структуры гистологических и цитологических препаратов с целью выявления доброкачественных и злокачественных поражений ткани. **2. Цитогенетика** – анализ кариотипа человека для выявления изолированных и множественных врожденных пороков развития, пренатальная цитогенетика – кариотипирование плодов человека на ранних стадиях эмбриогенеза с целью диагностики хромосомных болезней; цитогенетика эмбрионального развития человека – изучение функциональной активности отдельных хромосом или их сегментов и их влияния на процесс эмбриогенеза. **3. Онкоцитогенетика** – исследования корреляций онкологического процесса с хромосомными aberrациями в опухолевых клетках, включая исследования с использованием флюоресцентных ДНК – маркеров (FISH – анализ). Анализ и расчет параметров сложных форм хромосомопатий, обнаружение клонов клеток с хромосомными aberrациями на молекулярном уровне методами FISH – анализа. Визуализацию местоположения и обработку отдельных сегментов хромосом в интерфазных ядрах (на стадии митотического цикла), когда эти ядерные сегменты еще не распознаются микроскопически: определение транслокаций – перенос участка хромосомы в новое положение на той же или другой хромосоме; инверсий – разворотов участка хромосомы на 180 градусов при сохранении соединения с самой хро-

мосомой; делеций – утрат части хромосомы; дупликаций – удвоение участка хромосомы, приводящее к избыточному содержанию копий гена в клетке. **4. Радиационная медицина** – автоматизированное выявление и анализ специфических хромосомных aberrаций – маркеров радиационного воздействия, ретроспективное определение поглощенной человеком биологической дозы радиоактивного излучения.

В настоящее время общепризнанным фактом является то, что хроническое воздействие на население низкодозовой радиации, обусловленной последствиями различного рода ядерных взрывов и техногенных катастроф, является причиной формирования генетической нестабильности, которая ведет не только к новообразованиям, но может быть ответственна и за ряд ее отдаленных феноменов, реализующиеся на организменном уровне [1]. Процессы малигнизации клеток и дальнейшей опухолевой прогрессии тесно связаны с реорганизацией генома, что во множестве случаев выражается структурными и численными aberrациями хромосом, изменениями их отдельных областей (транслокациями), появлением клеточных клонов. В этой связи задача объективной оценки и прогноза цитогенетических изменений у населения, проживающего на пострадавших от чернобыльской катастрофы территориях, является чрезвычайно важной и требует проведения долгосрочного массового цитогенетического мониторинга населения и установления корреляционно – статистических взаимосвязей цитогенетического статуса индивидуума с общим состоянием организма и экологией территорий проживания. В этой связи на базе 6-ти комплексов «ХРОМОСОМА» и «ХРОМОСОМА – FISH» создана Республиканская сеть цитогенетического мониторинга населения РБ [2]. Это позволило оперативно выявлять категории населения цитогенетического и онкологического рисков, прогнозировать возможные отдаленные медико-генетические последствия хронического воздействия малых доз радиации и антропогенных факторов на организм человека в постчернобыльский период. Верифицировать индивидуальные и коллективные дозы лучевых нагрузок, проследить территориально – временную динамику цитогенетических нарушений, обнаруживать появление клонов клеток с хромосомными aberrациями – маркерами возможной опухолевой трансформации. Оперативно выявлять начальные стадии хромосомных болезней, требующих для достоверности заключения принимать решения по результатам обработки большого числа изображений метафазных пластинок хромосомных препаратов (более 1 – 2 тысяч на пациента), что было бы невозможным без обеспечения высокой степени автоматизации процесса обработки изображений хромосомных препаратов в разработанных комплексах.

Комплексы сертифицированы и разрешены к применению в медицинской практике Министерством здравоохранения Республики Беларусь. Комплекс «ХРОМОСОМА – FISH» удостоен Золотой медали на Санкт – Петербургской выставке – конгрессе в 2016 году.

1. Мельнов, С.Б. Молекулярно-генетические эффекты малых доз радиации // Чернобыльская катастрофа 15

лет спустя: научно–практические аспекты проблемы.: матер. обл. научно-практ. конф. г. Могилев 26 апр. 2001 г. – Минск: Тесей, 2001. – С. 96–103.

2. Иванов В.И., Лазарчик А.Н. Концепция, задачи и результаты создаваемой сети компьютерного цитогенетического мониторинга населения Республики Беларусь в постчернобыльский период // Фундаментальные и прикладные физические исследования. – Минск, 2009. – С. 379–391.

УДК 621. 382

## ЭЛЕКТРОФЛУКТУАЦИОННАЯ ДИГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Сопряков В.И., Чижонек М.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Известно, что качество кремния для полупроводниковых приборов имеет определяющее значение для получения надежных изделий. Например, одна из основных причин отказов силовых диодов связана с неоднородными распределениями тока и электрического поля по площади прибора, приводящими к уменьшению эффективной рабочей площади, локальным разогревам, раннему пробою. Неоднородное распределение тока по площади диода может являться следствием как неоднородности материала, так и неустойчивости однородного токопрохождения. Последнее связывается с наличием микроплазм – областей с высокой локальной плотностью тока. Такой характер тока обычно связан с локальным пробоем в местах расположения структурных неоднородностей – дислокаций, трещин, кластеров, неоднородностей легирования. Наличие областей с высокой локальной плотностью тока существенно снижает надежность приборов.

Электропараметрический контроль силовых приборов и структур на соответствие техническим условиям в большинстве случаев не выявляет признаков неустойчивого протекания тока, связанного с неоднородностью распределения удельного сопротивления и структурных дефектов. Оптимальным с целью контроля качества является выбор такого информативного параметра, который бы контролировался в области высоких обратных напряжений диода и был бы связан с неоднородностями и дефектами структуры, а также был чувствителен к деградиационным процессам, протекающим при испытании приборов.

Структура вольт-амперной характеристики (ВАХ) перед участком лавинного электрического пробоя диода несет информацию о неоднородности распределения тока по площади. При изучении структуры ВАХ полупроводниковых нелинейных элементов необходимо знать ширину и начальное напряжение линейных участков или более сложных особенностей ВАХ. Определение

этих величин из ВАХ в большинстве случаев невозможно. Применение техники двойного дифференцирования дает существенный выигрыш в разрешении начальных напряжений линейных участков ВАХ, связанных с отдельными микроплазмами, так как ее первая производная представляет кривую, подобную ступенчатой, а вторая – совокупность узких максимумов и минимумов.

Известно, что амплитуда второй гармоники переменного тока нелинейного элемента в режиме малого сигнала пропорциональна второй производной ВАХ ( $d^2I/dU^2$ ). Для ее измерения разработана измерительная установка модуляционного дифференцирования ВАХ, в которой реализован метод детектирования гармоник. Особенностью установки является широкий диапазон обратных напряжений 0...1000 В. Амплитуда переменного напряжения частотой 300 Гц регулировалась в диапазоне 1...10 В с целью достижения оптимального разрешения и помехоустойчивости.

В работе исследовались р-п-структуры, полученные диффузией бора в кремний n-типа с примесями фосфора с удельным сопротивлением 12 Ом·см.

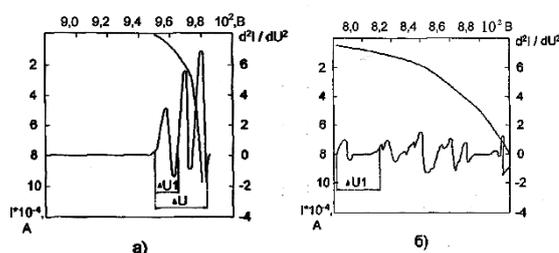


Рисунок 1 – ВАХ и ее вторая производная для контрольного (а) и потенциально ненадежного элемента (б)

Для выявления потенциально ненадежных элементов среди годных по значению обратного тока при напряжении 800 В исследовалась структура ВАХ в предпробойной области (рис. 1). Значения напряжений возрастания  $d^2I/dU^2$  соответствуют включениям отдельных микроплазм. Как видно из

рис. 1а, микроплазмы для однородных образцов распределяются в сравнительно узком интервале напряжений. При этом значение перенапряжения на первой микроплазме  $\Delta U \leq 30$  В. В потенциально ненадежных элементах количество микроплазм возрастало с двух-трех до пяти-шести, и располагались они в более широкой области напряжений  $\Delta U \geq 100$  В (рис. 1б), поэтому в качестве контрольного параметра было выбрано значение перенапряжения на первой микроплазме  $\Delta U$ , либо разность между напряжениями включения первой и второй микроплазмы  $\Delta U_1$  (рис. 1а,б). Исследованные элементы подвергались наработке электрическим током, что позволило выявить высокую вероятность отказа ( $P > 0,5$ ) в группе образцов с высокими значениями  $\Delta U$  и  $\Delta U_1$ .

Другим эффективным методом прогнозирования надежности является измерение низкочастотного шума, который обычно связывается с дефектами структуры, состоянием поверхности и контактов. Измерялось среднее квадратическое значение флуктуаций обратного тока в диапазоне напряжений 200...900 В. Коэффициент корреляции флуктуаций и  $\Delta U$  оказался равным 0,85.

Причины понижения напряжения пробоя до значения 300...400 В, а также возникновения "мягкой" обратной ВАХ изучались с целью диагностики брака. Для диагностики использовались четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления, измерения вольт-фарадных характеристик, послонное и селективное травление, измерение тока, индуцированного световым зондом.

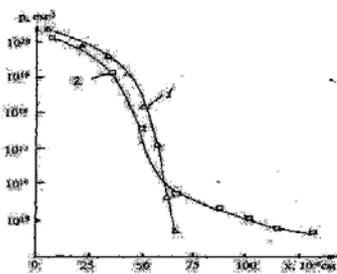


Рисунок 2 – Распределение концентрации дырок в  $p$ -области для контрольного (1) и бракованного (2) выпрямительных элементов

С помощью четырехзондового метода при послонном травлении установлено, что причиной понижения напряжения пробоя является

аномальная диффузия бора по дислокациям (рис. 2). Установлено прямыми наблюдениями, что причиной "мягкой" ВАХ являются локальные дефекты механической обработки.

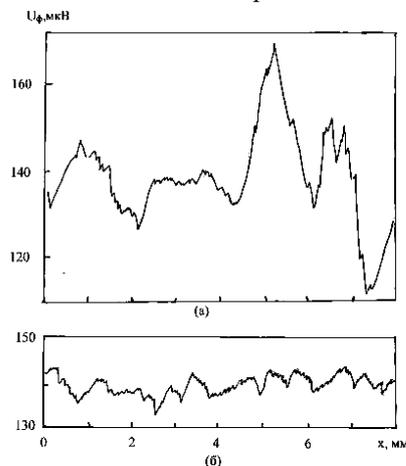


Рисунок 3 – Распределение фото-ЭДС на межфазовой границе полупроводник-электролит (а – кремниевая пластина с неоднородным распределением электрофизических параметров; б – контрольная пластина)

В работе показана возможность применения метода измерения фотоЭДС на межфазовой границе полупроводник-электролит для неразрушающего входного и операционного контроля полупроводниковых пластин и структур, используемых в производстве силовых диодов. Их особенностью является наличие поверхностного нарушенного слоя. Метод измерения фотоЭДС, однако, дает хорошие результаты на пластинах с удаленным нарушенным слоем. Применение аммиачно-перекисной отмывки кремниевых пластин, поступающих в производство, а также выпрямительных элементов позволило выявить на излучении  $He-Ne$  лазера с длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм образцы с макрофлуктуациями сигнала до  $\pm 30$  % на длине 1 мм (рис. 3). Исследование влияния длины волны излучения показали, что при  $\lambda = 0,8$  мкм, что соответствует ширине запрещенной зоны кремния, величина фотоЭДС возрастает в 7...8 раз. Такие измерения с высоким соотношением сигнал-шум можно также проводить с использованием интерференционного фильтра или источника "белого" света.

УДК 621.039.58

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Гришин С.А., Селянтьев В.А., Климов Я.А., Климова Д.А.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

Создание многоканальных спектрометрических комплексов мониторинга ионизирующих излучений требует тщательных и всесторонних исследований и изучения основных базовых

элементов (сцинтилляторов, фотоприемных устройств, микроконтроллеров, ПЛИС, систем на кристаллах, алгоритмических и программных

средств), на основе которых эти комплексы разрабатываются [1–2].

Для изучения работы базовых элементов многоканальных спектрометров нами была разработана и изготовлена система регистрации ионизирующих излучений, структурная схема и внешний вид которой представлены на рис.1 и рис.2.

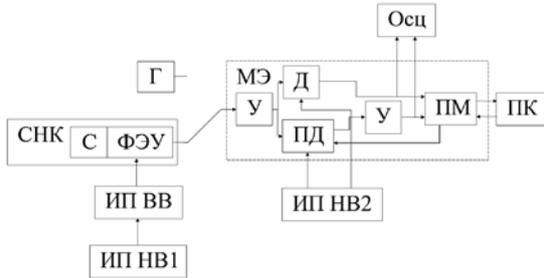


Рисунок 1 – Структурная схема системы регистрации ионизирующих излучений

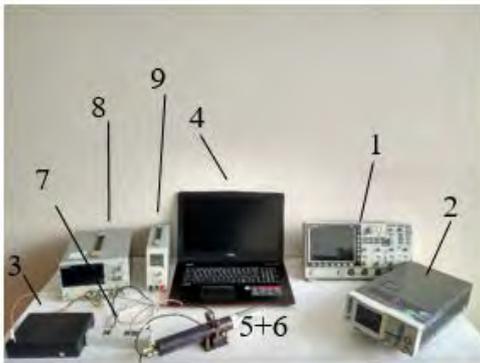


Рисунок 2 – Система регистрации ионизирующих излучений

В состав системы регистрации входят: Осц (1) – осциллограф; Г (2) – генератор; МЭ (3) – модуль электроники с дискриминатором (Д), пиковым детектором (ПД), усилителем (У), процессорным модулем (ПМ); ПК (4) – персональный компьютер; С (5) – сцинтиллятор; ФЭУ (6) – фотоэлектронный умножитель; ИП ВВ (7) – источник питания высоковольтный; ИП НВ1,2 (8,9) – источники питания низковольтные.

ФЭУ и сцинтилляторы размещаются в светонепроницаемом корпусе (СНК). Генератор служит для исследования характеристик Д и ПД, осциллограф - для измерений напряжений и исследования формы сигналов, мультиметр - для контроля уровня высокого напряжения, подаваемого на ФЭУ.

МЭ состоит из аналоговых и цифровых схем и процессорного блока на базе микроконтроллера (ПМ).

Аналоговые схемы усиливают сигналы ФЭУ и осуществляют пиковое детектирование, удерживая значение амплитуды импульсного сигнала неизменным на время работы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП).

Цифровые схемы реализуют амплитудный дискриминатор (Д), который формирует цифровой

импульс при превышении сигнала заданного порога, и цифровой ключ, который необходим для перевода ПД в режим слежения. Значения порогов подбираются экспериментально с учетом уровней шумов и помех.

Для оцифровки сигналов, обработки накопления и пересылки данных на ПК используется процессорный модуль (ПМ) на базе микроконтроллера. ПМ имеет встроенный АЦП, который запускается дискриминатором при появлении импульса. После накопления данных ПМ отправляет их на ПК, где происходит их дальнейшая обработка и визуализация на экране монитора в виде графиков спектров.

Блок-схема алгоритма работы ПМ представлена на рисунке 3. До поступления сигнала дискриминатора контроллер находится в режиме ожидания. При поступлении сигнала с дискриминатора запускается АЦП. По окончании цикла преобразования АЦП вырабатывает сигнал «сброс», который поступает на ПД для перевода АЦП в режим слежения и записи данных с АЦП в буфер. После записи в буфер ожидается окончание сигнала «сброс» ПД. При заполнении буфера данные пересылаются на ПК для дальнейшей их обработки и визуализации на экране монитора, затем процесс повторяется.

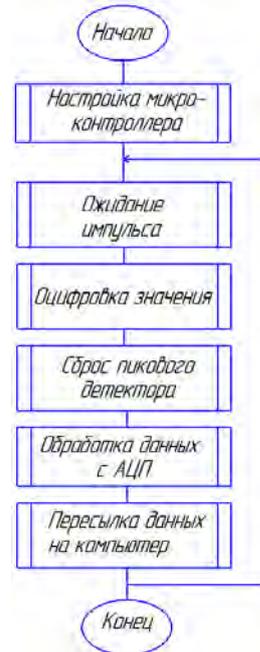


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера

Разработанное программное обеспечение (ПО) верхнего уровня служит для задания режимов работы, обработки принимаемых данных (с использованием методов статистики, аппроксимации, фильтрации и амплитудного анализа) и их визуализации на экране монитора. ПО совместимо по протоколу передачи и формам представления информации с ПО комплекса

средств тестирования многоканального бортового спектрометра [3].

С использованием системы регистрации ионизирующих излучений и ПО проведены исследования характеристик различных типов сцинтилляторов (NaI(Tl), CsI, пластиковые сцинтилляторы), ФЭУ (ФЭУ-85, ФЭУ-60, Hamamatsu R5611 и др.), усилителей сигналов при их различных сочетаниях в виде устройств «сцинтиллятор + ФЭУ+ усилитель».

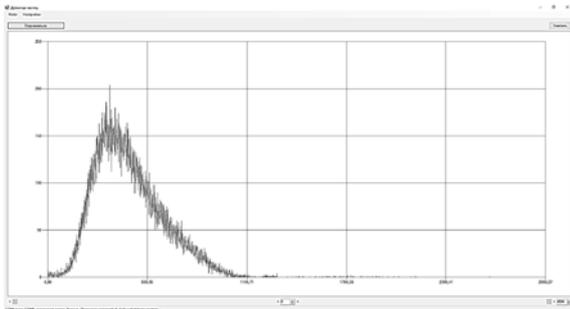


Рисунок 4 – Амплитудное распределение фонового излучения при исследовании устройства «сцинтиллятор NaI(Tl)+ФЭУ-85+усилитель»

В ходе проведения экспериментов

- исследовалось влияние температуры,
- определялись уровни темновых токов,
- оценивалось влияние контактного слоя «сцинтиллятор-ФЭУ»,
- подбирались и исследовалась элементная база (ОУ, диоды, микроконтроллеры и др.),
- находились оптимальные значения порогов для дискриминатора,
- дорабатывалось и отлаживалось ПО,
- строились и анализировались спектры излучений.

В качестве иллюстрации работы ПО, на рисунке 4. представлен спектр, полученный при

исследовании устройства «сцинтиллятор NaI(Tl)+ФЭУ-85+усилитель».

#### Выводы:

1. Разработана система регистрации ионизирующих излучений.
2. Разработано тестовое программное обеспечение, позволяющее оперативно задавать параметры испытаний и режимы работы, проводить экспресс-обработку сигналов и их амплитудный анализ.
3. С использованием разработанной системы регистрации и программного обеспечения проведены экспериментальные исследования различных типов ФЭУ, сцинтилляторов и микросхем, позволившие найти оптимальные сочетания элементов для устройств «сцинтиллятор + ФЭУ+ электроника», что крайне важно для создания интеллектуальных детекторных модулей регистрации ионизирующих излучений.

1. Аппаратно-программные средства для наземной обработки бортовых спектрометров заряженных частиц / А.Г. Батищев [и др.] // Журнал «Ядерная физика и инжиниринг». - 2014, том 5. - №3. - С. 247-256.
2. Пейтон А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях : справ. пособие / А. Дж. Пейтон, В. Волш. – М.: БИНОМ, 1994. – 352 с.
3. Гришин С.А., Селянтьев В.А., Недвецкий Н.С., Киселева Д.А. Программное обеспечение для работы с экспериментальным образцом комплекса средств тестирования блоков бортового сцинтилляционного спектрометра заряженных частиц в околоземном и космическом пространстве. Национальный центр интеллектуальной собственности Свидетельство № 968 от 29.08.2017.

E-mail: grs@mail@mail.ru

УДК 621.317.422:593.816.2:621.318.1

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОКОВ МНОГОСЛОЙНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ ДЕТЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ

Гришин С. А.<sup>1</sup>, Селянтьев В. А.<sup>1</sup>, Недвецкий Н. С.<sup>1</sup>, Волкович М.Н.<sup>1</sup>, Климентовский В.В.<sup>1</sup>, Колдашов С. В.<sup>2</sup>, Александрин С. Ю.<sup>2</sup>, Батищев А. Г.<sup>2</sup>, Гальпер А. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Для бортовой научной аппаратуры космических аппаратов (КА) характерна высокая стоимость ее доставки к месту функционирования и, во многих случаях, невозможность устранения неполадок после запуска. Приоритетной задачей при создании такой аппаратуры является снижение риска возникновения отказов. Традиционно это подразумевало проведение большого объема наземных испытаний, как отдельных блоков, так и всей аппаратуры КА, на что затрачивалось много времени и средств. В условиях

современного рынка космических услуг важными требованиями, предъявляемыми к бортовой космической аппаратуре и наземным системам, являются снижение их стоимости и сокращение сроков разработки. Таким образом, существует необходимость в создании современных автоматизированных систем для проведения наладки, наземных испытаний и калибровки бортовой научной аппаратуры КА [1–2]. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси совместно с

НИЯУ МИФИ (г. Москва) разработан и изготовлен экспериментальный образец комплекса средств тестирования (КСТ), который позволяет автоматизировать процесс контроля, упростить разработку и отладку алгоритмического и программного обеспечения, сократить продолжительность и трудоемкость диагностики блоков сцинтилляционного спектрометра. КСТ включает: блок электроники, состоящий из блока программно-аппаратных средств (ПАС) и блока имитации; блок имитации включает блок дискриминаторов, блок каналов связи, блок преобразователей и источник питания высоковольтный (рис.1 - рис.5), а также место рабочее оператора и регистрирующие приборы.

Комплекс средств тестирования обеспечивает: питание блоков сцинтилляционного спектрометра; прием информации от многослойного сцинтилляционного блока спектрометра; проведение отбора логических сигналов с целью формирования триггерных сигналов; тестирование блоков сцинтилляционного спектрометра; контроль телеметрии; сбор, накопление и передачу массивов информации по каналам телеметрии.



Рисунок 1 – Блок программно-аппаратных средств



Рисунок 2 – Блок дискриминаторов



Рисунок 3 – Блок каналов связи



Рисунок 4 – Блок преобразователей



Рисунок 5 – Источник питания высоковольтный

Разработанное для комплекса программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс проведения испытаний блоков спектрометра. В меню главного окна программы КСТ, можно выбрать проверяемый блок, настроить параметры испытательных сигналов и запустить процесс тестирования. Программное обеспечение имеет модульную структуру и обеспечивает: прием, обработку и отображение регистрируемых сигналов; тестирование блоков спектрометра; получение амплитудных спектров и проведение статистической обработки; протоколирование окончательных результатов обработки. Совместные лабораторные испытания КСТ и блоков многослойной сцинтилляционной детекторной системы проводились в НИЯУ МИФИ (рис. 6).



Рисунок 6 – Проведение испытаний блоков многослойной сцинтилляционной детекторной системы

На рисунках 7 и 8 приведены примеры полученных в ходе испытаний результатов - осциллограммы сигналов с детекторной системы и результаты тестирования спектрометра.

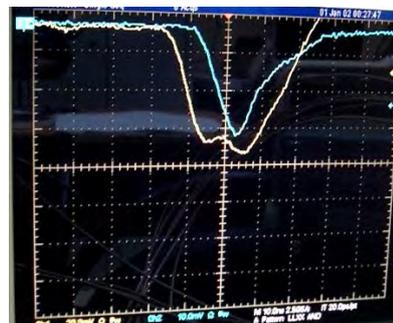


Рисунок 7 – Осциллограммы сигналов с детекторной системы

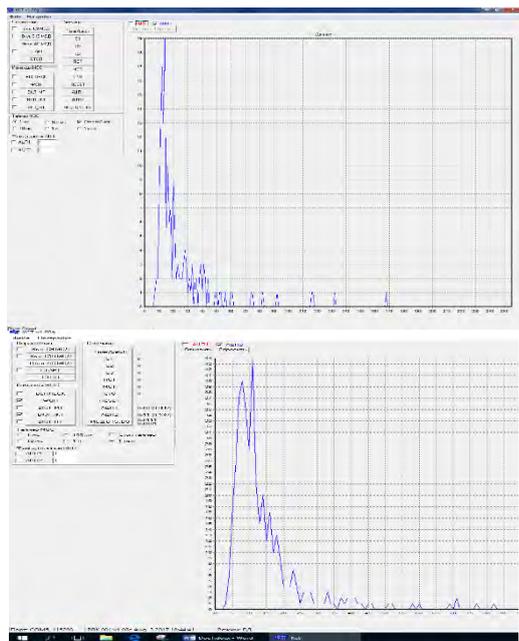


Рисунок 8 - Примеры результатов тестирования спектрометра

Проведенные совместные лабораторные испытания экспериментального образца комплекса средств тестирования и блоков многослойной

сцинтилляционной детекторной системы показали высокую эффективность применения КСТ. Разработанный комплекс средств тестирования позволяет автоматизировать процесс наземных испытаний и контроля блоков бортового сцинтилляционного спектрометра, упрощает разработку и отладку алгоритмического и программного обеспечения, сокращает время и трудоемкость калибровки детекторной системы. Использование комплекса позволяет существенно сократить трудоемкость и повысить качество выполнения процедур контроля основных параметров испытываемой аппаратуры.

1. Создание и применение контрольно-испытательной аппаратуры для проведения экспериментальных исследований и отработки методов калибровки космофизических спектрометров / С.А. Гришин [и др.] // Сб. науч. тр. V Конгресса физиков Беларуси (27–30 октября 2015 г.). – Минск: Изд-во «Ковчег», 2015. – С. 239–240.
2. Аппаратно-программные средства для наземной отработки бортовых спектрометров заряженных частиц / А.Г. Батищев [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5. – №3. – С. 247–256.

E-mail: grsamail@mail.ru

УДК 621.317.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗГАРА ТЕПЛОАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Гришин С.А.<sup>1</sup>, Бунчук А.А.<sup>1</sup>, Климентовский В.В.<sup>1</sup>, Буй А.Н.<sup>1</sup>, Ягодников Д.А.<sup>2</sup>, Лапицкий В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Реактивный двигатель представляет собой сложный технический объект, о состоянии которого можно судить по результатам измерения большого количества различных параметров. Традиционно применяемые контактные средства и способы не всегда могут обеспечить необходимое быстродействие и достоверность контроля, не позволяют проводить раннюю диагностику процессов разгара внутри газового тракта, контроль динамики и оптимальных режимов процессов горения. Поскольку при работе силовые агрегаты становятся источниками различных физических полей, характеристики которых могут нести информацию о состоянии и режимах работы оборудования, то исследование этих характеристик позволяет получать дополнительную информацию для построения систем диагностики состояния и аварийной защиты. Для решения таких задач могут найти применение современные электромагнитные методы и средства контроля, с помощью которых можно определять электрофизические характеристики ионизированного газового потока путем регистрации

полей вблизи от двигателя [1, 2]. Наиболее перспективным представляется использование мультисенсорных систем, основанных на применении электромагнитных, оптических, тепловых и иных методов и средств контроля. В ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» разработан и изготовлен экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса (ПАК), предназначенный для регистрации параметров процессов разгара теплонапряженных элементов конструкции ракетных двигателей (ЖРД) с использованием бесконтактных электромагнитных, оптических, тепловых, акустических, вибрационных и других методов и средств контроля. Комплекс позволяет исследовать процессы возникновения электромагнитных полей высокотемпературных газовых потоков; влияние режимных параметров работы двигателя на электромагнитные характеристики таких потоков; амплитудно-частотные характеристики электромагнитных полей и оптического излучения этих потоков; процессы попадания частиц материалов и конденсированной фазы в газовый

тракт ЖРД; процессы разрушения проточной части ЖРД. В состав ПАК входят, показанные на рисунках 1-3, блок регистрации электрических и магнитных полей, который позволяет регистрировать величины компонент вектора напряженности переменного магнитного поля и напряженность переменного электрического поля; блок регистрации спектров оптического излучения (например излучения факела ЖРД); блок регистрации температур, определяющий параметры теплового поля; а также блок регистрации видеоданных процесса проведения испытаний; блок регистрации вибраций и звуковых колебаний; блок электроники и рабочее место оператора.



Рисунок 1 – Блок регистрации электрических и магнитных полей



Рисунок 2 – Блок регистрации спектров оптического излучения



Рисунок 3 – Блок регистрации температур

Регистрация информативных параметров с помощью ПАК при проведении огневых испытаний модельных ЖРД с охлаждаемым соплом и с разгорающимся вкладышем критического сечения проводилась на стенде филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Измерялись переменные магнитные и электрические поля и регистрировались вибрации, спектры оптического излучения факела двигателей. На рисунке 4 показан пример расположения датчиков на ЖРД.



Рисунок 4 – Расположение на ЖРД датчиков магнитного и электрического полей и вибраций

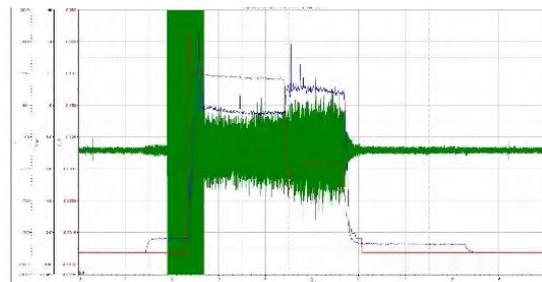


Рисунок 5 – Профиль изменения давления в КС ЖРД, расхода горючего и осциллограмма сигнала с преобразователя переменного магнитного поля

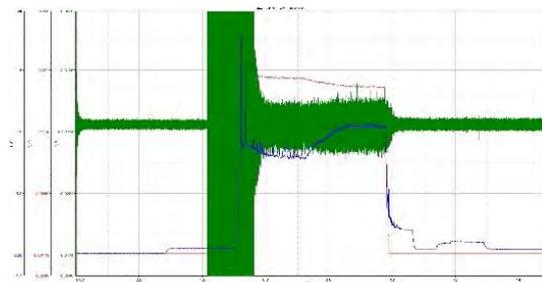


Рисунок 6 – Профиль изменения давления в КС ЖРД, расхода горючего и осциллограмма сигнала с преобразователя переменного электрического поля

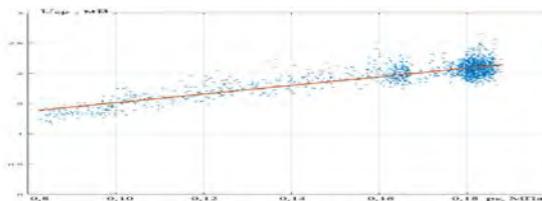


Рисунок 7 – Зависимость величины сигнала преобразователя переменного магнитного поля от давления в КС

Сопоставление информации, полученной при помощи штатных измерительных средств испытательного стенда и при помощи разработанного ПАК позволило выявить взаимосвязь между параметрами работы модельных ЖРД и характеристиками регистрируемых вблизи от них электрического и магнитного полей. Например, на рисунках 5 и 6 приведены осциллограммы сигналов, зарегистрированных при помощи преобразователей переменного магнитного и

электрического полей, соответственно, синхронизированные с профилем изменения давления в камере сгорания (КС) ЖРД и расхода горючего. На них можно определить характерные фазы работы ЖРД: открытие клапана окислителя, включение и выключение системы воспламенения, повышение давления в камере сгорания, закрытие клапана подачи горючего. Максимальный сигнал в обоих случаях регистрируется при работе электроискровой системы воспламенения. Показанная на рисунке 7 зависимость величины сигнала преобразователя переменного магнитного поля от давления в КС оказывается близкой к линейной и может быть использована в качестве диагностического признака при разработке быстродействующей системы аварийной защиты ЖРД. Регистрация спектрального состава излучения факела ЖРД до начала и во время разгара вкладыша критического сечения позволила зафиксировать появление спектральных линий, связанных с излучением выносимых из газового тракта двигателя материалов.

Проведенные исследования подтверждают перспективность разработки бесконтактных методов диагностики, основанных на электрофизических, электромагнитных и иных явлениях, параметры которых существенно зависят от характеристик рабочих процессов и состояния проточной части ЖРД.

1. Гришин, С.А. Результаты регистрации параметров переменных магнитных полей модельного ЖРД с использованием преобразователя индукционного типа / Гришин С.А., Климентовский В.В., Ягодников Д.А. // Электроника-инфо. – 2015. – №12. – С. 51–54.
2. Корреляционный и спектральный анализы электрофизических характеристик продуктов сгорания углеводородного топлива модельного жидкостного ракетного двигателя / Ягодников Д.А. [и др.] // Электронное научно-техническое издание «Инженерный журнал: наука и инновации». - №1(61). – 2017. – С. 1–17.

Email: grs@mail@mail.ru

**Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 621.396.67

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН. ПРАКТИЧЕСКАЯ  
РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

**Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.**

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко»  
Белорусского государственного университета»*

*Минск, Республика Беларусь*

Основной характеристикой антенны, как излучающего и приемного устройства, является диаграмма направленности (ДН), определяющая структуру поля излучения антенны на значительном (по отношению к электрическим размерам излучающей апертуры антенны) расстоянии от антенны – в дальней зоне. Физический смысл понятия дальней зоны состоит в том, что исследуемая антенна находится в поле плоской волны. В зависимости от способа формирования такой плоской волны различают два основных метода измерения ДН: измерения в дальней зоне и измерения в ближней зоне.

Измерения в дальней зоне являются прямым методом, достаточно просты, не требуют сложной аппаратуры, однако обладают рядом недостатков:

- значительные расстояния между исследуемой и зондовой антенной, что предполагает проведение измерений вне помещений;
- существенное влияние окружающих предметов и подстилающей поверхности;
- зависимость от погодных условий;
- невозможность обеспечения скрытности измерений;
- невозможность измерения пространственной ДН (как правило, измеряют некоторые сечения).

Измерения в ближней зоне свободны от этих недостатков. Методологической основой этих измерений является создание на небольшом расстоянии от исследуемой антенны некоего излучателя, формирующего в раскрыве антенны плоскую волну. Это возможно двумя путями:

- формирование участка плоского фронта с помощью специальной антенны – коллиматора (коллиматорный метод);
- синтезирование участка плоского фронта за счет последовательного помещения слабонаправленной антенны в узловые точки, расположенные на некоторой поверхности вблизи исследуемой антенны и измерения амплитуды и фазы поля излучения в этих точках. Полученная информация обрабатывается и путем математических расчетов вычисляются требуемые характеристики (радиоголографический метод).

Общие преимущества ближнезонных измерений заключаются в том, что измерения проводятся в помещении на небольших расстояниях. Для минимизации побочных воздействий и обеспечения скрытности измерений исследуемая антенна и измерительная аппаратура располагаются в безэхо-

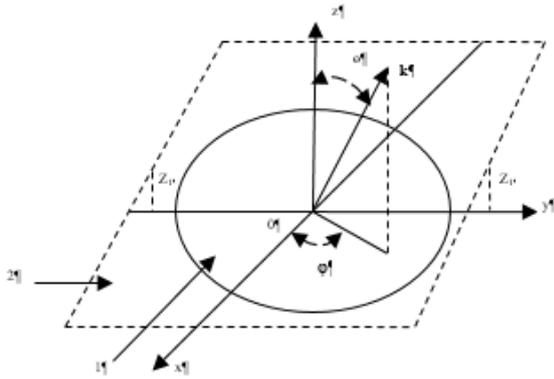
вых камерах, представляющих собой экранированные помещения, все поверхности которых покрыты радиопоглощающим материалом.

**Коллиматорный** метод по сути аналогичен прямым измерениям в дальней зоне и позволяет измерять основные сечения ДН. Заметим также, что коллиматорный метод в последнее время получил достаточно широкое распространение, поскольку позволяет проводить измерения параметров радиолокационной заметности различных объектов, вплоть до реальных образцов. Основным недостатком коллиматорного метода является высокая стоимость оборудования, в первую очередь самого коллиматора.

С точки зрения антенных измерений наиболее универсальным является **радиоголографический** метод, основой которого являются прямые измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля исследуемой антенны на некоторой поверхности в непосредственной близости от излучающей апертуры. Так как интенсивность поля излучения антенной системы и его структура на различных расстояниях от излучающей апертуры однозначно математически связаны, то по измеренному полю на некотором расстоянии возможно расчетным путем восстановить структуру поля на любом расстоянии от антенны. На значительном расстоянии от антенны (в дальней зоне) структура поля определяет диаграмму направленности. Теоретические основы такого методологического подхода заложены в классических работах по электродинамике и теории антенн [1], а их практическое приложение непосредственно к антенным измерениям началось в конце прошлого века [2,3]. Теоретически было показано, что измерения поля излучения антенн в ближней зоне возможно на некоторой поверхности вблизи апертуры исследуемой антенны. Для плоской, цилиндрической и сферической поверхности были предложены уравнения, связывающие структуру полей в ближней и дальней зонах. При этом выбор той или иной поверхности определялся конструкцией антенны и структурой поля излучения.

**Планарные измерения в ближней зоне**

Введем декартову систему координат  $Oxyz$ . Исследуемая антенна находится в плоскости  $z = 0$  (1), а плоскость измерения 2 расположена параллельно исследуемой антенне на некоторой высоте  $Z_1$ . Измерения и расчеты определяют поле в верхней полусфере  $z > 0$ .



Определим волновой вектор  $k$ :

$$k = i_x k_x + i_y k_y + i_z k_z,$$

где  $i_x, i_y, i_z$  – орты декартовой системы координат.

Также определим сферическую систему координат, в которой угол  $\varphi$  (азимутальный угол) – угол между осью  $x$  и проекцией волнового вектора  $k$  на измеряемую поверхность, угол  $\theta$  (угол места) – угол между осью  $z$  вектором  $k$ . Тогда

$$k_x = k \sin\theta \cos\varphi; \quad k_y = k \sin\theta \sin\varphi; \quad k_z = k \cos\theta.$$

Компоненты вектора  $E$  в дальней зоне могут быть представлены в виде [1]:

$$E_\theta(k_x, k_y) = A \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} S_x(k_x, k_y);$$

$$E_\varphi(k_x, k_y) = A \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} S_y(k_x, k_y);$$

$$A = j e^{jkR} / \lambda R.$$

Функции  $S_{x,y}(k_x, k_y)$  определяются выражением:

$$S_{x,y}(k_x, k_y) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} E_{xy}(x, y) \cdot e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy,$$

где  $E_{x,y}(x, y)$  – тангенциальные составляющие вектора электрического поля, измеренного на плоскости [4]. В случае, если измеряемое поле излучения линейно поляризовано, ориентацией системы координат возможно одну из составляющих  $E_x$  или  $E_y$  сделать равной нулю.

Для выполнения измерений в ближней зоне радиолокационным методом необходимы механические сканирующие устройства, обеспечивающие перемещение зондовой антенны по выбранной поверхности, измерительный приемник для измерения амплитуды и фазы СВЧ поля в заданных точках указанной поверхности, обеспечивающий необходимый динамический диапазон и требуемые точности измерений в заданном частотном диапазоне, контроллер ввода цифровых данных в компьютер и программное обеспечение для проведения математических расчетов, визуализации и хранения результатов.

В настоящее время ведущие фирмы, такие как Agilent, Keysight, NSI-MI, Franconia, ORBIT/FR разрабатывают измерительные комплексы и их компоненты для измерения и тестирования антенных систем, методики их применения, а также регулярно проводят семинары по антенным измерениям. Аналогичная ситуация сложилась и в России. Несколько фирм (в частности ООО «Научно-производственное предприятие ТРИМ»), компания «РАДИОЛАЙН») предлагают метрологически аттестованные измерительные комплексы для измерений в ближней зоне, реализующие коллиматорный и радиолокационный методы. Комплексы обеспечивают высокие метрологические характеристики, позволяющие измерять характеристики реальных объектов, однако имеют весьма высокую стоимость.

В [5] изложена концепция построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне. В рамках представленной концепции в лаборатории прикладной электродинамики НИИ ПФП реализован экспериментальный образец аппаратно – программного комплекса для измерений в X-диапазоне радиолокационным методом по плоскости. Проведенное тестирование показало, что комплекс имеет удовлетворительные точностные характеристики. С использованием экспериментального образца измерительного комплекса проведены измерения АФР и восстановления пространственных ДН нескольких типов антенн: измерительной антенны П6-23 и моноимпульсных антенн различных конструкций. Полученные результаты позволили оценить влияние параметров зонда и дискретов выборок на точность восстановления диаграмм. Проведены сравнения восстановленных ДН с результатами измерений в дальней зоне, которые показали хорошее совпадение.

1. Кюн Р. Микроволновые антенны. – Л., 1967. – 518 с.
2. Захарьев, Л.Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л.Н. Захарьев, В.И. Турчин, Н.М. Цейтлин – М., 1985. – 368 с.
3. Бахрах, Л.Д. Методы измерения излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.П. Курочкин. – Л., 1985. – 272 с.
4. Курочкин, А.П. Теория и техника антенных измерений / А.П. Курочкин // Антенны. – 2009. – № 7. – С. 39–45.
5. Будаи, А.Г. Разработка концепции построения аппаратно – программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне / А.Г. Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2017. – №2. – С 151–158.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Скурту И.Т., Ерошенко А.С., Брановицкий И.И.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Важнейшими характеристиками используемых в электромашиностроении и электронике магнитных цепей являются удельные магнитные потери (при заданной амплитуде магнитной индукции) и амплитуда магнитной индукции (при заданной амплитуде внешнего магнитного поля) материалов, из которых они состоят.

Измерения магнитных свойств ферромагнитных материалов имеют достаточно большой бюджет неопределенности, значимыми компонентами которого являются неопределенность измерения мгновенного значения внешнего магнитного поля, а также неопределенности установления параметров стационарного режима перемагничивания: амплитуды магнитной индукции или амплитуды внешнего магнитного поля.

Стационарный режим перемагничивания или рабочая точка должен исследоваться при установленной в ГОСТ [1] синусоидальной форме магнитного потока. Это обстоятельство делает достижение рабочей точки более нелинейным процессом и снижает повторяемость результатов в серии независимых измерений вследствие возможной немонотонности движения в магнитных координатах (увеличение, а затем снижение амплитуды намагничивающего сигнала) [2-3]. Дополнительно стоит отметить проблему выхода на точку как таковую [4-6]. На участке насыщения кривой намагничивания наблюдаются значительные отклонения амплитуды магнитного поля при отклонениях амплитуды магнитной индукции в несколько раз ниже, чем достижимая по индукции точность измерений (рисунок 1). Это увеличивает разброс значений при измерении удельных магнитных потерь.

Таким образом, возможности алгоритмов управления экспериментом (имеющие системные неустраняемые ограничения) вносят свой вклад в бюджет неопределенности, тогда как наилучшей для практики является ситуация, при которой бюджет неопределенности состоит только из точностных характеристик измерительных приборов. Этот сценарий можно реализовать при наличии модели поведения ферромагнитного тела. Таких моделей существует достаточно много, и они широко используются при проектировании устройств с магнитной цепью, однако допущения, применяемые в них, не позволяют строить на их основе “каркас” задачи прецизионного измерения.

В 1956 году А.Н. Колмогоров доказал [7] принципиальную решаемость задачи представления функции достаточно произвольного вида на нейронной сети (его работы в этой области

были затем обобщены Хехт-Нильсеном в конце 1980-х).

Семейство вложенных друг в друга стационарных петель магнитного гистерезиса при заданной частоте перемагничивания (каждая внешняя петля соответствует большей индукции) можно интерпретировать как линии уровня некоторой поверхности. В роли третьей координаты могут выступать как удельные магнитные потери (рисунок 2), так и амплитуды индукции либо поля. Такая поверхность, при наличии описывающего ее аналитического выражения позволяет исключить из бюджета неопределенности ошибку выхода на точку, оставив в нем только ошибку измерения магнитной величины (зависящую только от характеристик оборудования).

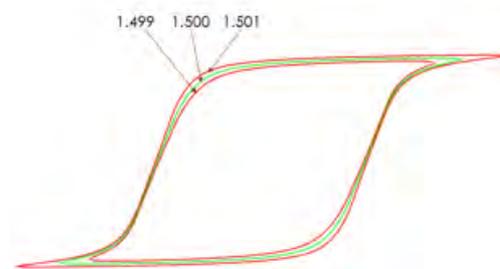


Рисунок 1 – Петли магнитного гистерезиса на участке насыщения; цифрами указаны значения амплитуды магнитной индукции (к задаче выхода на точку)

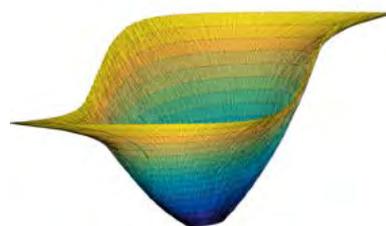


Рисунок 2 – Поверхность удельных магнитных потерь электротехнической стали на частоте 50 Гц; стационарные циклы перемагничивания выступают как линии уровня

На практике, подобная поверхность в аналитическом доступном неясном виде может быть получена для конкретного образца посредством снятия семейства стационарных петель магнитного гистерезиса с некоторым небольшим шагом. После этого данные петель (эпюры сигналов) в высоком разрешении подвергаются многомерной интерполяции посредством обучения нейронной сети с подходящей архитектурой (например, FFN или NARX). После того как сеть обучена, любую линию уровня можно получить с точностью, ограниченной только точностью входных данных.

Вариации температуры или частоты могут быть формализованы как поверхность более высокой размерности (рисунок 3).

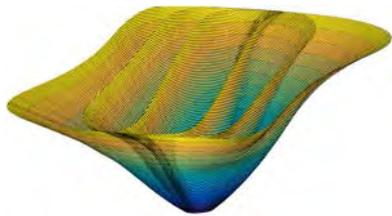


Рисунок 3 – Поверхности удельных магнитных потерь при стационарном перемагничивании электротехнической стали на различных частотах (внешней поверхности соответствует более высокая частота)

Полученная таким образом совокупность экспериментальных данных в неявном виде содержит полную информацию о поведении исследуемой магнитной цепи. Это позволяет решить задачу получения магнитных характеристик в режиме синусоидального потока двумя способами: получить на основе сети сигнал для буфера генератора системы намагничивания (он будет содержать рассчитанные необходимые предсказания); либо с помощью обучения сети в нужном направлении рассчитать стационарный синусоидальный цикл перемагничивания на основе некоторого множества несинусоидальных циклов.

В настоящее время такие работы ведутся в Институте прикладной физики НАН Беларуси.

- ГОСТ 12119.4-98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических

свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля. Мн., 1999 г.

- Зирка, С.Е., Мороз Ю.И. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга. Часть 1. Постановка задачи и описание вопроса // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 2. – С. 22–27.
- Ерошенко А.С., Скурту И.Т., Брановицкий И.И. «Синусоизация магнитного потока при испытаниях электротехнической стали» // Материалы 8-й международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2015». г. Минск, 25–27 ноября 2015 г. – С. 231–232.
- Брановицкий И.И., Скурту И.Т., Размыслович Г.И. Ерошенко А.С. Эталонная установка и стандартные образцы для измерения магнитных свойств электротехнической стали // Материалы 8-й международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2015». г. Минск, 25–27 ноября 2015 г. – С.184–185.
- Брановицкий, И.И. Автоматическое задание амплитудных значений магнитной индукции при измерении характеристик электротехнических сталей / И.И.Брановицкий, М.Н. Путырский// Энергетика. – 2005. – №1. – С.9–14.
- Ерошенко А.С., Скурту И.Т., Брановицкий И.И. «Алгоритм движения в магнитных координатах при задании режима перемагничивания магнитомягких материалов» // Материалы 8-й международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2015». г. Минск, 25–27 ноября 2015 г. – С. 230–231.
- Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одной переменной и сложения // ДАН СССР. – 1957. – Т. 114, Вып. 5. – С. 953–9.

УДК 621.317.39:536.53

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОДОШВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Джежора А.А.<sup>2</sup>, Буркин А.Н.<sup>2</sup>, Борозна В.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГНУ «ИТА» НАН Беларуси,

<sup>2</sup> Витебский государственный технологический университет  
Витебск, Республика Беларусь

Структура полиуретановых подошвенных материалов характеризуется сложным иерархическим строением и представляет собой статистический ансамбль микро и макроэлементов, различных по своим физико-химическим и физико-механическим свойствам, размерам и форме расположения их элементов. Задачей является не только создание технологий получения указанных материалов с прогнозируемыми свойствами, но и разработка неразрушающих не инвазивных методов и средств диагностирования структуры материалов, контроль ее на различных стадиях создания изделий из них. Одним из наиболее часто встречаемых дефектов обуви является разрушения полимерных подошв в процессе её носки. Этот дефект связан с нарушением

технологических режимов литья, а также качеством исходного сырья. Проявляется это в виде изломов подошв, выкрошивании её фрагментов, интенсивном износе поверхности и др. Последнее приводит к возврату обуви, а следовательно, и экономическим издержкам предприятия-изготовителя. Диагностировать качество подошв визуально невозможно, а применение инструментальных методов, заложенных в существующих ТНПА, требует немалых затрат времени и расходов материалов на проведение лабораторных испытаний образцов и подошв.

Анализ различных методов и средств неразрушающего контроля показал, что для реализации экспресс-оценки качества подошв может применяться диэлькометрический метод контроля [1].

В основе диэлькометрических методов неразрушающего контроля лежат взаимосвязи диэлектрических характеристик с различными материальными свойствами. Изменения плотности, влагосодержания, структуры, соотношения компонентов материала всегда косвенно влияют на его диэлектрические характеристики.

Диэлькометрический метод был применен, для обнаружения не плотностей и рыхлостей в овечьих шкурах [2], обнаружения взрывчатых и наркотических веществ в подошвах обуви [3], контроле физико-механических свойств листовых нетканых материалов (бумага, кожа, фибролит и другие), обладающих анизотропией [4].

Разнообразие конструктивных и схемотехнических решений, применяемых в диэлькометрическом методе контроля, вызвано многообразием объектов контроля, функционально техническим назначением средств измерения и требованиями, предъявляемыми к метрологическим, эксплуатационно-техническим характеристикам. Непрерывное повышение этих требований: точности, разрешающей способности, воспроизводимости, стабильности обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования конструкций емкостных датчиков, схем их подключения и технологий изготовления с учетом успехов в области микроэлектроники, компьютерных технологий.

В ГНУ «ИТА» НАН Беларуси был создан пакет программ, для численных расчетов полей электроемкостных преобразователей, основанный на использовании интегральных уравнений Фредгольма первого рода [5]. Такой подход в теории расчета накладных измерительных конденсаторов позволил улучшить чувствительность датчиков к контролируемым параметрам, поднять силу сигнала (рабочей емкости датчика).

С помощью меандрового накладного измерительного конденсатора в плоскости контролируемых образцов создавалось плоскопараллельное поле. Накладной измерительный конденсатор был выполнен на подложке из тефлона ( $\epsilon = 2,1$ ) толщиной 2мм, его металлизация составила 0,5, ширина электродов 2мм, их толщина 30  $\mu\text{м}$ , погонная длина электродов составила  $l = 140$  мм. К датчику подключался измеритель иммитанса E7-20 с возможностью подключения через интерфейс RS-232C и математической обработки результатов измерений. Это средство измерений имеет широкий диапазон рабочих частот (25 Гц  $\div$  1 МГц), класс точности 0,1 и высокую скорость измерений.

Исследованиям подвергались пластины литьевых композиций на основе пенополиуретанов и др. ингредиентов. Композиции разрабатывались для получения износостойких подошвенных материалов. Плотность образцов вырубленных из пластин вторичного пенополиуретана определяли по ГОСТ 267-73 «Резина. Методы определения плотности» [6]. Линейные размеры образцов

определялись по ГОСТ 17073-71 [7] с помощью металлической измерительной линейки (ГОСТ 427-75) с ценой деления 1 мм и толщиномера типа ТР 10-60 (ГОСТ 11358-7) с точностью 0,01 мм при давлении измерительной площадки на образец 4,9-14,8 кПа. Масса элементарных проб измерялась на весах Nagema тип 34.003 с погрешностью не более 0,01 г. Плотность образцов позволила оценить однородность литья полиуретановых подошв, наличие скрытых раковин.

Все образцы сканировались меандровым накладным измерительным конденсатором в направлении основы материала и поперек. В качестве измеряемого параметра бралась емкость многосекционного накладного измерительного конденсатора (МНИК), так как она является интегральной характеристикой и наиболее полно отражает прочностные и деформационные свойства контролируемых образцов. Было установлено:

- образцы полиуретана обладают слабой дисперсией диэлектрических свойств в частотном диапазоне 1 кГц  $\div$  500 кГц;
- образцам присуща анизотропия диэлектрической проницаемости в плоскости материала;
- воздушные поры вносят в структуру материала беспорядок.

Результаты предварительных исследований физико-механических свойств литьевых композиций на основе пенополиуретанов и др. ингредиентов приведены в таблице 1.

Таблица 1– Основные физико-механические характеристики и емкость МНИК

Образцы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Емкость МНИК, пф
1	1,171	0,450
2	1,206	0,448
3	1,190	0,462
4	1,202	0,454
5	1,182	0,440
6	1,142	0,433
7	1,266	0,485
8	1,181	0,463

Ее анализ позволяет сделать следующие выводы:

- 1) между емкостью многосекционного накладного измерительного конденсатора и плотностью образцов существует хорошая корреляционная взаимосвязь;
- 2) разброс значений емкостей накладного измерительного конденсатора по топографии пластин говорит о сложности технологических режимов литья;
- 3) одним из перспективных направлений диагностики качества подошв является выборочный контроль выпускаемой (или партии закупленной) продукции путем сравнения с образцом-эталоном посредством накладного измерительного конденсатора.

1. Xiaobei B. Li, Sam D. Larson, Alexei S. Zyuzin, and Alexander V. Mamishev "Design Principles for Multi-channel Fringing Electric Field Sensors," IEEE SENSORS JOURNAL, V. 6. № 2, 2006. pp. 434–440.
2. Yunus M. A. M. et al. Sheep skin property estimation using a low-cost planar sensor //Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC. – 2009. – С. 482–486.
3. Sears J. Interdigital dielectrometry based detection and identification of dangerous materials for security applications: diss. – Massachusetts Institute of Technology, 2003.
4. Рубаник В. В. Контроль качества нетканых материалов / В.В. Рубаник, А.А. Джежора, А.М. Науменко, Ю.А. Завацкий // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2017. – N 1.
5. Джежора А. А. Модель накладного измерительного конденсатора / А. А. Джежора, В. В. Рубаник // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2010. – N 3. – С. 99–103 .
6. ГОСТ 17073–71 Кожа искусственная. Метод определения толщины и массы 1 м<sup>2</sup>. – введ. 01.07.72. – Минск: Белстандарт, 1996. – 15с.
7. ГОСТ 267–73. Резина. Методы определения плотности. – Взамен ГОСТ 267-60; введ. 01.01.1975. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 1975. – 8 с.

УДК 389:66.012.1-389:621.3.089.68

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ В ОБЛАСТИ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Ананьин В.Н., Мирончик А.М., Мохнач М.В., Скакун С.С.**

*Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь*

Единство измерений в области газового анализа обеспечивает в Республике Беларусь комплекс национальных эталонов:

Национальный эталон единицы молярной доли компонентов в газовых смесях НЭ РБ 13-04;

Национальный эталон единицы молярной доли компонентов природного газа в газовых смесях НЭ РБ 16-08;

Национальный эталон единицы молярной доли атмосферных экологически опасных компонентов НЭ РБ 18-10;

Национальный эталон единиц молярной и массовой концентрации компонентов сжиженных углеводородных газов НЭ РБ 22-13.

Информация о метрологических характеристиках национальных эталонов размещена на официальном сайте БелГИМ [www.belgim.by](http://www.belgim.by).

Размер единицы молярной (массовой) доли компонентов газовой смеси воспроизводится национальными эталонами в виде эталонных газовых смесей (ЭГС), приготовленных в баллонах под давлением статическим гравиметрическим методом согласно [1] с последующей верификацией состава приготовленных ЭГС согласно [2] аналитическими методами.

В соответствии с «Соглашением о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами» (СІРМ МРА) БелГИМ принимает участие в международных сличениях, проводимых региональной метрологической организацией КООМЕТ<sup>1</sup>. Цель сличений – установление эквивалентности

национальных эталонов и предоставление объективного подтверждения калибровочных и измерительных возможностей (calibration and measurement capabilities – СМС) национальных метрологических институтов для размещения в Базе данных ключевых сличений Международного бюро мер и весов (key comparison database – KCDB ВІРМ) .

Метрологические характеристики национальных эталонов Республики Беларусь в области газоаналитических измерений подтверждены результатами следующих международных сличений, зарегистрированных в KCDB ВІРМ:

СООМЕТ.QM-K3 «Автомобильные газы», 2005 г.;

СООМЕТ.QM-K1.a «Оксид углерода в азоте», 2008 г.;

СООМЕТ.QM-K23.b «Природный газ», 2008 г.;

СООМЕТ.QM-S1 «Дополнительные сличения первичных эталонов содержания компонентов в газовых средах: NO в азоте (50 мкмоль/моль)», 2013 г.;

СООМЕТ.QM-K76 «Ключевые сличения первичных эталонов содержания компонентов в газовых средах: SO<sub>2</sub> в азоте (100 мкмоль/моль)», 2013 г.;

СООМЕТ.QM-S5 «Дополнительные сличения национальных эталонов в области анализа газовой смеси CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> в азоте (автомобильные газы)», 2014 г.;

СООМЕТ.QM-S3 «Дополнительные сличения эталонных газовых смесей: «загрязнители атмосферного воздуха: CO в азоте, 5 мкмоль/моль», 2016 г.;

<sup>1</sup> Организация Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений

COOMET.QM-K111 «Пропан в азоте, 1000 мкмоль/моль», 2014-2016 гг.;

COOMET.QM-S4 «Дополнительные сличения «Измерение содержания компонентов (C<sub>2</sub>–C<sub>5</sub>) в смесях сжиженных углеводородов» – не завершены.

Калибровочные и измерительные возможности БелГИМ в области газового анализа, подтвержденные результатами сличений, доступны на сайте ВІРМ [3].

УДК 534.6

## ИМПЕДАНСНАЯ ТРУБА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И ПОТЕРЬ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЗВУКА

Петров С.Н., Горошко С.М., Прудник А.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Традиционные методы измерения коэффициентов звукопоглощения и потерь при передаче (звукоизоляции) являются трудоемкими и дорогостоящими.

Наиболее известны способы измерений с использованием реверберационных камер [1–3]. Для больших реверберационных камер минимально допустимый объем составляет 30 м<sup>3</sup>, для малых – 2 м<sup>3</sup>. Рекомендуемая площадь образца для малых камер составляет 1–1,5 м<sup>2</sup>.

Коэффициент звукопоглощения вычисляется косвенно, для чего необходимо последовательно измерить время реверберации в пустой камере и в камере с образцом и определить реверберационный коэффициент звукопоглощения материала.

Реверберационный коэффициент звукопоглощения образца учитывает отношение площади внутренних поверхностей камеры к площади поверхности образца, среднеарифметический коэффициент звукопоглощения камеры без образца, объем и среднее время реверберации пустой камеры.

Изоляция воздушного шума определяется как разность между уровнями звукового давления в частях камеры, разделенных исследуемым образцом с учетом эквивалентной площади звукопоглощения (или времени реверберации) камеры низкого уровня.

В соответствии с ГОСТ 16297-80 [4], нормальный коэффициент звукопоглощения может определяться с использованием интерферометра (труба Кундта). Для измерений в диапазоне 125–2000 Гц длина интерферометра должна составлять 1 м, внутренний диаметр 0,1 м. При измерениях используют эффект стоячей волны, возникающей при отражении звука от установленного в конце трубы образца. Коэффициент звукопоглощения определяется через отношение максимального и минимального звукового давления.

1. СТБ ИСО 6142-2003 Анализ газов. Приготовление калибровочных газовых смесей. Гравиметрический метод.
2. СТБ ИСО 6143-2003 Анализ газов. Методы сравнения для определения и проверки состава газовых смесей для калибровки.
3. Calibration and Measurement Capabilities // Bureau International des Poids et Mesures [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access: [http://kcdb.bipm.org/appendixC/QM/BY/QM\\_BY\\_4.pdf](http://kcdb.bipm.org/appendixC/QM/BY/QM_BY_4.pdf).

Альтернативным методом, позволяющим измерять нормальный коэффициент звукопоглощения и потери при передаче (звукоизоляции), является так называемый метод импедансной трубы. Наиболее известной версией оборудования, реализующего данный метод, является комплект 4206-Т компании Brüel & Kjaer [5]. Этот вариант считается наиболее часто используемым в акустических измерениях.

Применение импедансной трубы обеспечивает следующие преимущества по сравнению со стандартными методиками: компактность установки и исследуемых образцов, возможность автоматизировать измерения.

Существенным недостатком такой установки является высокая цена. Для непрофильных организаций такая цена установки перекрывает преимущества.

Решением этой проблемы может стать разработка установки со сниженной стоимостью при сохранении приемлемого уровня точности.

На сегодняшний день методы, основанные на применении импедансной трубы, описаны в [6, 7]. В [6] описывается метод определения звукоизоляции образцов (потерь на прохождение) и для его реализации требуется четыре микрофона. В [7] описывается метод с использованием двух микрофонов, который направлен на определение нормального коэффициента звукопоглощения.

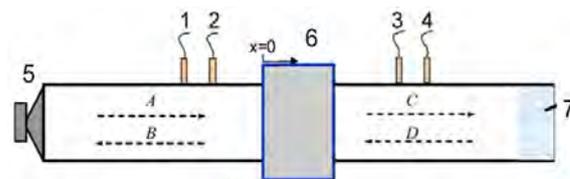


Рисунок 1 – Импедансная труба:  
1–4 — микрофоны; 5 — источник звука; 6 — образец;  
7 — акустическая заглушка

Установка включает в себя трубу с источником звука, установленным с одного конца, и испытуемого образца, установленного в трубе (рис. 1). Для измерения звукоизоляции в трубу устанавливаются четыре микрофона, по два с каждой стороны от образца. Источник шума генерирует плоскую волну, после чего в трубе образуется стоячая волна.

Математической основой метода является нахождение передаточных функций для микрофонов, затем выражения звуковых волн  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  (падающей, отраженной и прошедшей через образец) через эти передаточные функции. На основе полученных данных строится матрица-четырёхполосник и вычисляются коэффициенты передачи звука и звукопоглощения.

Для работы в широком диапазоне частот необходимо использовать набор из труб с внутренним диаметром 30 мм (частотный диапазон от 50 до 1600 Гц) и труб диаметром 100 мм (частотный диапазон от 500 до 6400 Гц), а также держатели образца соответствующих диаметров. В соответствии с [6, 7], материал труб должен быть жестким, т.е., это может быть алюминий или сталь.

Оптимальным решением для источника звука является компрессионный драйвер типа JBL 2426J, представляющий собой специализированный мембранный громкоговоритель, который излучает звук в рупор. Рупором для компрессионного драйвера является корпус установки.

Следует использовать конденсаторные микрофоны свободного поля, так как они показывают

более точный результат по сравнению с микрофонами диффузного поля и поля давления. Для работы в частотном диапазоне до 5600 Гц, согласно [7], следует выбирать микрофон с капсулом диаметром 1/2".

Для снижения стоимости установки в качестве генератора звука стоит использовать внешнюю звуковую карту, персональный компьютер или ноутбук с программным обеспечением MatLab. В качестве тестового сигнала использовать «белый» шум.

1. ГОСТ 31704-2011. Материалы звукопоглощающие. Методы измерения звукопоглощения в реверберационной камере.
2. ГОСТ 27296-2012 Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций.
3. ГОСТ 26417-85. Материалы звукопоглощающие строительные. Метод испытаний в малой реверберационной камере.
4. ГОСТ 16297-80 Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний.
5. Transmission Loss Tube Kit Type 4206-T [Электронный ресурс] – режим доступа <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1039.ashx>.
6. ASTM E90-09 (2016) Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements.
7. ASTM E1050-12 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.

УДК 519.2:006

## РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК КОНТРОЛЯ

**Серенков П.С., Мовламов В.Р., Письменский П.И.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Одним из наиболее важных вопросов в сфере современного строительства зданий и сооружений является качество выполняемых работ по обеспечению огнезащиты строительных конструкций (далее – СК).

Огнезащита – один из аспектов пожарной безопасности СК. В последние годы свойство огнезащищённости СК приобретает все большее значение при строительстве зданий и сооружений, т.к. в условиях пожара СК достаточно быстро утрачивают свои эксплуатационные свойства, теряют несущую способность. Воздействие высоких температур во время пожара при наличии действующих нагрузок вызывает температурные деформации и, как следствие, деформации ползучести, что приводит к обрушению СК. Часто потеря прочности даже одного элемента (колонны, несущей стены) может привести к обрушению всей СК. Поэтому сегодня очень высоки требования к огнезащите объектов.

Одним из наиболее распространенных способов обеспечения огнезащиты СК является метод оштукатуривания поверхностей, заключающийся в нанесении специальных покрытий на поверхности СК. Разработанный СТБ 11.03.02 [1] регламентирует семь различных групп огнезащитной эффективности СК, для каждой из которых приписан норматив по времени, показывающий, сколько минут СК может гарантированно выстоять и не обрушиться в условиях воздействия огня. Для обеспечения временного норматива, регламентирована минимальная толщина специального огнезащитного состава (далее – ОС).

Именно толщина слоя огнезащитных покрытий строительных элементов и является одним из важнейших контролируемых показателей пожарной безопасности СК.

Следует отметить, что на сегодняшний день вопрос о контроле толщины ОС методологически не проработан. Центр сертификации и лицензированных видов деятельности МЧС

Республики Беларусь определил необходимость разработки методики контроля, как приоритетное направление НИР с учетом высоких рисков, связанных с некорректным принятием решений по результатам контроля. В частности, некорректная идентификация группы огнезащитной эффективности СК вследствие недостоверного контроля толщины покрытий чревата возникновением угрозы жизни людей.

Основная задача НИР – обоснование подхода и разработка методики контроля толщины огнезащитного состава, нанесенного на поверхность элементов СК. Предполагается, что методика контроля должна войти как часть в проект государственного стандарта Республики Беларусь «Контроль качества огнезащитных работ. Общие технические требования. Методы проведения».

Для обоснования подхода разработана модель рисков получения недостоверных результатов контроля, которая предполагает наличие двух типов рисков (первого и второго рода).

Риски первого рода связаны с некорректностью результатов контроля в одной точке элемента СК. Последнее, в свою очередь, - с неопределенностью результата измерений толщины покрытия в точке и общеизвестными рисками потребителя  $\beta$  и поставщика  $\alpha$ . Приоритетным принят риск потребителя  $\beta$ , когда измеренная толщина покрытия в точке контроля принимается как соответствующая требованиям, в то время как в силу неопределенности результата измерений толщина покрытия в точке установленным требованиям не соответствует.

Риски второго рода связаны с не-репрезентативностью выборочного контроля СК. Очевидно, что план контроля (тип плана, количество и расположение точек контроля, браковочное число) не гарантирует абсолютной корректности принятия решения о соответствии (несоответствии) всего объекта.

В ходе обоснования подходов и разработки методики контроля методологически были проработаны вопросы минимизации рисков первого и второго родов. В данном докладе мы рассмотрим только вопросы анализа и минимизации рисков первого рода. Установлены 2 источника рисков первого рода: 1) некорректное заключение о соответствии в точке контроля, 2) повторяемость результатов и обработка данных.

**1 источник.** Для минимизации рисков первого рода актуальны 2 подхода:

1) Применение аналитического подхода, предполагающего расчет вероятности недостоверного оценивания, на основе комбинирования закона распределения толщины покрытия на всей поверхности объекта контроля и закона распределения случайной составляющей результата измерений в одной точке (рис. 1) [2].

2) Применение метода «защитной полосы» (рис.2) в соответствии с [3]. Метод заключается в том, что допускаемая граница контроля смещается

в сторону увеличения толщины покрытия на величину поправки  $\Delta$ . При этом минимально допустимая толщина покрытия  $h_{\Sigma \text{ном}}$  увеличивается на  $\Delta$ . В качестве  $\Delta$  выступает расширенная неопределенность метода измерений толщины покрытия, рассчитанная в данном случае с доверительной вероятностью  $P=0,9973$ . Однако, следует иметь в виду, что увеличению зоны «защитной полосы», приводит к увеличению риска поставщика  $\alpha$ . Т.е. измеренная толщина покрытия в точке контроля принимается как не соответствующая требованиям, в то время как на самом деле в требования к толщине покрытия выдержаны.

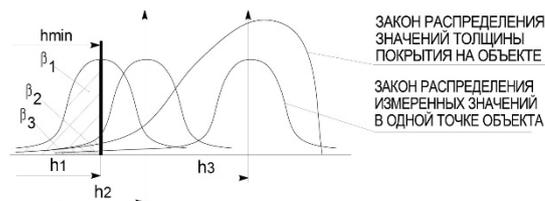


Рисунок 1 – Комбинирование законов распределения

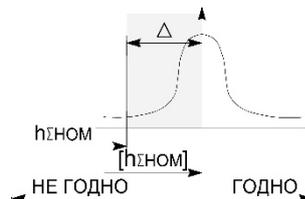


Рисунок 2 – Метод «защитной полосы»

Для обоснования выбора методов минимизации рисков первого рода, было проведено статистическое исследование технологического процесса нанесения покрытия. С целью получения объективной информации, был реализован эксперимент с полной группировкой (таблица) [4].

Таблица 1

	Объект малой величины		Объект большой величины		Объект средней величины		Объект малой величины	
	Стена	Переграда	Занавес	Лестничные марши	Переграда	Перекрытие	Стена	Люк
бσ, мкм	262	1539	729	398	372	983	464	488
Ср	0,65	0,11	0,23	0,43	0,46	0,17	0,37	0,35

Анализ полученной информации показал, что процесс нанесения покрытия является статистически неуправляемым, т.к. индекс воспроизводимости  $C_p < 1,33$ .

Вывод – для статистически не управляемого процесса следует применить метод «защитной полосы», который делает риск независимым в отношении точности измерений [3].

**2 источник.** Данный источник рисков первого рода проявляется как составляющая неопределенности результата измерений в одной точке, связанная с повторяемостью результатов.

Дополнительные статистические исследования и дисперсионный анализ результатов показали, что стандартное отклонение воспроизводимости ( $\sigma_R = 195$  мкм), соизмеримо со стандартным отклонением повторяемости ( $\sigma_r = 193$  мкм).

Для **минимизации** влияния этого источника рекомендовано проводить в одной точке контроля не менее трех повторений, а за результат измерений принимать медиану, как робастную характеристику [5].

1. СТБ 11.03.02-2010 Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний.

2. ГОСТ 8.051-81 Руководящий нормативный документ. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм.
3. Guide OIML G 19:2017 Роль неопределенности измерений при принятии решений об оценке соответствия в законодательной метрологии.
4. СТБ ИСО 5725-3-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений.
5. СТБ ИСО 5725-5-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений.

УДК 53.089.62; 519.245; 539.125.52

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЗИМЕТРИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 10 МЭВ

Комар Д.И.<sup>1</sup>, Лукашевич Р.В.<sup>1</sup>, Гузов В.Д.<sup>1</sup>, Кутень С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета

Минск, Республика Беларусь

Согласно рекомендациям международных стандартов ИЕС, энергетический диапазон приборов радиационного мониторинга окружающей среды вокруг АЭС должен быть расширен до 7 МэВ, а дозиметров и мониторов, используемых на рабочих местах и во время аварийных ситуаций до 10 МэВ [1-3].

Получение высокоэнергетического гамма-излучения на ускорительной технике сопряжено со многими трудностями, связанными с эксплуатацией оборудования, требованиям по радиационной безопасности и квалификации персонала. Для производственных нужд необходимо иметь поле в стандартизованной геометрии, с которым достаточно легко работать при калибровке разрабатываемых средств измерений.

Существует возможность использовать гамма-излучение от захвата тепловых нейтронов на мишени из подходящего с точки зрения энергетического спектра излучения материала. В международном стандарте ISO 4037-1:1996 рекомендуется использовать мишени из титана и никеля, для получения полей с энергией до 7 МэВ и до 10 МэВ соответственно. Поток тепловых нейтронов может быть получен с использованием радионуклидных источников, помещенных в замедлитель. Проблема заключается в отсутствии подобных полей излучения в стандартизованных условиях, где можно построить метрологическую базу для проведения калибровки.

В настоящее время в метрологическом обеспечении средств измерений нейтронного излучения в качестве эталонов применяются установки, формирующие коллимированное поле излучения от радионуклидных источников [4]. При экспозиции

источника нейтронов формируется стационарное во времени поле высокоэнергетического гамма-излучения, которое вызвано ядерными реакциями взаимодействия нейтронов с материалами облучателя установки. Захватное гамма-излучение от мишени, размещенной в потоке тепловых нейтронов от облучателя, увеличивает интенсивность гамма-излучения в определенном энергетическом интервале. Таким образом, полученная геометрия измерений на основе поверочной нейтронной установки может быть использована для целей калибровки спектрометрических и дозиметрических средств измерений гамма-излучения.

1. Radiation protection instrumentation – Transportable, mobile or installed equipment to measure photon radiation for environmental monitoring: IEC 61017 Ed.1. – Publ. 23.10.2015. – 2015. – 42 p.
2. Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation – Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors: IEC 60846 Ed.1. – Publ. 07.04.2009. – 2009. – 116 p.
3. Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation – Part 2: High range beta and photon dose and dose rate portable instruments for emergency radiation protection purposes: IEC 60846 Ed.2. – Publ. 16.12.2015. – 2015. – 34 p.
4. Кожемякин В. А. Дозиметрические установки гамма-излучения УДГ-АТ110, УДГ-АТ130 – новая продукция УП «АТОМТЕХ» в области метрологии ионизирующих излучений / В. А. Кожемякин, В. Д. Гузов, А. В. Антонов // Новости науки и технологий. – 2009. – Т. 11, №2. – С. 33–37.

**ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ И ПЕРЕДАЧЕ ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НАЦИОНАЛЬНЫМ ЭТАЛОНОМ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НЭ РБ 26-15**

**Вольнец А.С.**

*Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»  
Минск, Республика Беларусь*

Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ26-15 предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы плотности потока энергии (далее ППЭ) в свободном пространстве. В основу работа эталона положен метод эталонной антенны, в соответствии с которым значение ППЭ определяется с помощью эталонного измерителя ППЭ, состоящего из эталонной измерительной антенны и измерителя мощности [1].

**Источниками неисключенной систематической погрешности** воспроизведения и передачи единицы ППЭ являются: погрешность измерения мощности на выходе эталонной антенны, погрешность эффективной площади эталонной антенны, погрешность за счёт рассогласования в СВЧ измерительном тракте, погрешность за счёт переотражений между антеннами, погрешность из-за неплоскостности электромагнитного поля в месте сличения антенн, погрешность замещения эталонной антенны на исследуемую, погрешность из-за непостоянства электромагнитного поля за время измерений, погрешность из-за переотражений электромагнитных полей от стен безэховой камеры [2]. Анализ показал преобладание ряда составляющих погрешности, в первую очередь: погрешности определения эффективной площади эталонной антенны и погрешности из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте [3].

**Оценивание погрешности из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте**

В общем случае, действительное значение мощности на выходе эталонной антенны можно определить по формуле [4]

$$P_A = P_{изм} \frac{|1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A|^2}{(1 - |\dot{\Gamma}_П|^2) \cdot (1 - |\dot{\Gamma}_A|^2)}, \quad (1)$$

где  $P_{изм}$  – мощность, поглощённая термоэлектрическим преобразователем;

$P_A$  – действительное значение мощности сигнала на выходе антенны;

$\dot{\Gamma}_A$  и  $\dot{\Gamma}_П$  – комплексные коэффициенты отражения измерительной антенны и термоэлектрического преобразователя измерителя мощности.

Тогда относительную систематическую погрешность из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте можно найти из формулы

$$\delta_{рас} = \frac{(1 - |\dot{\Gamma}_П|^2) \cdot (1 - |\dot{\Gamma}_A|^2)}{|1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A|^2} - 1 =$$

$$= -\frac{|\dot{\Gamma}_П|^2}{(1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A)^2} - \frac{|\dot{\Gamma}_A|^2}{(1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A)^2} + \left( \frac{1}{(1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A)^2} - 1 \right) \quad (2)$$

Как видно из формулы (2), можно выделить три составляющие погрешности из-за рассогласования  $\delta_{рас}$ :  $\delta_{рас1}$ ,  $\delta_{рас2}$ ,  $\delta_{рас3}$ . Пренебрегая погрешностями второго порядка малости, получим

$$\delta_{рас1} \approx -|\dot{\Gamma}_П|^2; \quad (3)$$

$$\delta_{рас2} \approx -|\dot{\Gamma}_A|^2; \quad (4)$$

$$\delta_{рас3} \approx 2 \cdot |\dot{\Gamma}_П| \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол между единичным вектором и вектором, соответствующим векторному произведению  $\dot{\Gamma}_П \cdot \dot{\Gamma}_A$ .

Среди существующих методов уменьшения систематической погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте нами использован метод, основанный на использовании поправочного множителя. Причем для получения максимальной точности нами было предложено измерение коэффициентов отражения векторным анализатором цепей и расчет поправочного множителя с учетом модулей и аргументов комплексных коэффициентов отражения.

Для ввода поправочного множителя мы ввели ряд обозначений

$$\dot{\Gamma}_A = \Gamma_{AC} + j\Gamma_{AS};$$

$$\Gamma_{AC} = |\dot{\Gamma}_A| \cos \varphi_A; \quad \Gamma_{AS} = |\dot{\Gamma}_A| \sin \varphi_A, \quad (6)$$

$$\dot{\Gamma}_П = \Gamma_{PC} + j\Gamma_{PS};$$

$$\Gamma_{PC} = |\dot{\Gamma}_П| \cos \varphi_P; \quad \Gamma_{PS} = |\dot{\Gamma}_П| \sin \varphi_P, \quad (7)$$

где  $\Gamma_{PC}$ ,  $\Gamma_{AC}$ ,  $\Gamma_{PS}$ ,  $\Gamma_{AS}$  – действительные и мнимые составляющие комплексных коэффициентов отражений термоэлектрического преобразователя и измерительной антенны;

$|\dot{\Gamma}_П|$ ,  $|\dot{\Gamma}_A|$  – модули комплексных коэффициентов отражений термоэлектрического преобразователя и измерительной антенны, отн. ед.;  $\varphi_P$ ,  $\varphi_A$  – аргументы комплексных коэффициентов отражений термоэлектрического преобразователя и измерительной антенны, градус.

Теперь, учитывая формулы (1), (6) и (7) после математических преобразований получим выражение для поправочного множителя  $\mu$

$$\mu = \frac{(1 - \Gamma_{AC}\Gamma_{PC} + \Gamma_{AS}\Gamma_{PS})^2 + (\Gamma_{AC}\Gamma_{PS} + \Gamma_{AS}\Gamma_{PC})^2}{(1 - \Gamma_{PC}^2 - \Gamma_{PS}^2) \cdot (1 - \Gamma_{AC}^2 - \Gamma_{AS}^2)} \quad (8)$$

Выполнив измерения комплексных коэффициентов отражения и воспользовавшись выражениями (6) – (8), можно найти поправочный множитель  $\mu$ , использовать его для коррекции результатов измерений мощности сигнала на выходе измерительной антенны.

Неисключенный остаток систематической погрешности из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте  $\delta_{S_{pac}}^*$  после внесения поправочного множителя можно оценить, используя формулу [4]

$$\delta_{S_{pac}}^* = k \cdot \sqrt{\left(\frac{|\delta_{pac4}|}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{|\delta_{pac5}|}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{|\delta_{pac6}|}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{|\delta_{pac7}|}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{|\delta_{pac8}|}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$|\delta_{pac4}| = 2 \cdot |\dot{\Gamma}_{II}|^2 \cdot \delta_{|\Gamma|}, \quad |\delta_{pac5}| = 2 \cdot |\dot{\Gamma}_A|^2 \cdot \delta_{|\Gamma|},$$

$$|\delta_{pac6}| \approx 2 \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot |\dot{\Gamma}_{II}| \cdot \delta_{|\Gamma|}, \quad |\delta_{pac7}| \approx 2 \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot |\dot{\Gamma}_{II}| \cdot \delta_{|\Gamma|},$$

$$|\delta_{pac8}| \approx 3,14 \cdot |\dot{\Gamma}_{II}| \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot \delta_{\varphi}.$$

Анализ показал, что использование поправочного множителя с учетом комплексных коэффициентов отражения позволяет снизить в 9–10 раз. Неисключенный остаток систематической погрешности из-за рассогласования в СВЧ тракте после введения поправочного множителя с учетом комплексных коэффициентов отражения в 4–6 раз меньше, чем после использования скалярных. При этом, чем больше значения коэффициентов отражения термоэлектрического преобразователя, тем эффективнее применение векторных измерений.

**Значение погрешности эффективной площади эталонной антенны** зависит от метода её определения и точностных характеристик применяемого при этом оборудования. Существуют различные методы определения эффективной площади: метод эталонной антенны, метод эталонного поля, методы двух и трех антенн. При реализации первых двух методов необходимо наличие эталонной антенны с известным коэффициентом усиления (эффективной площадью). Такие измерения могут быть выполнены метрологическими службами, располагающими более высокоточными эталонами, например, ВНИИФТРИ с использованием Государственного первичного эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля ГЭТ 160-2006 (РФ). Относительная погрешность результатов измерений эффективной площади с применением первых двух методов может составлять от 7 до 12 %.

Реализация второго и третьего метода основана на формуле передачи в свободном пространстве, в соответствии с которым для системы с двумя антеннами (излучающей и приемной), расположенных на некотором расстоянии друг от друга, мощность, принимаемая на согласованной нагрузке, подключенной к приемной антенне определяется как

$$P_r = P_o \cdot G_A \cdot G_B \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot R} \right)^2$$

где  $P_r$  – принятая измерительной антенной мощность,  $P_o$  – мощность, подведенная к передающей антенне,  $G_A$  – коэффициент усиления по мощности передающей антенны, и  $G_B$  – коэффициент усиления по мощности приемной антенны. Эта формула передачи неявно предполагает, что антенны подобраны по их поляризации, ориентации и расстояние между антеннами таково, что преобладают условия дальнего поля.

Формула передачи в свободном пространстве может быть записана в логарифмической форме

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)$$

Метод двух антенн предполагает, что две антенны идентичны, тогда и их коэффициенты усиления равны

$$(G_A)_{dB} = (G_B)_{dB} = \frac{1}{2} \cdot \left[ 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right) \right]$$

Процедура определения коэффициента усиления по мощности антенн сводится к измерению  $R$ ,  $\lambda$ ,  $P_o$  и  $P_r$ , а затем вычисления  $(G_A)_{dB}$ .

Если антенны А и В не являются идентичными, то требуется третья антенна для определения коэффициентов усиления.

Для метода трех антенн выполняется три набора измерений с использованием всех комбинаций трех антенн. Результатом является система из трех совместных уравнений, из которых быть определен коэффициент усиления (эффективная площадь) [5]:

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)_{AB}$$

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)_{AC}$$

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)_{BC}$$

Реализация метода трех антенн заслуживает отдельного более детального рассмотрения. Относительная погрешность результатов измерений эффективной площади с применением метода трех антенн может достигать 1 - 3 %. Преимущество метода в том, что он позволяет выполнить измерения с высокой точностью и не требует наличия эталонных антенн. Недостатком является сложная процедура измерений и необходимость наличия трех конструктивно идентичных антенн. В настоящее время в БелГИМ ведутся работы по определению эффективной площади эталонных антенн методом трех антенн.

**Погрешность из-за переотражений от стен безэховой камеры** обусловлена тем, что энергия в приемную антенну попадает не только прямым лучом, но и по более сложным схемам, отражаясь

от пола и стен безэховой камеры. При этом значение погрешности из-за переотражений определяется коэффициентом безэховости камеры. Существуют различные способы определения коэффициента безэховости камеры: метод КСВН, метод наложения диаграмм направленности, метод двух приемных антенн и др. [6]. Нами был использован метод, основанный на перемещении излучающей изотропной антенны в объеме камеры, определении КСВН камеры в соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2016 с последующим пересчетом полученных результатов в коэффициент безэховости камеры. Для этих целей используется специальный комплект изотропных антенн и позиционер. Измеренное значение коэффициента безэховости составило – (20...30) дБ, что является достаточным для проведения измерений с погрешностью из-за переотражений в безэховой камере порядка 1–2%.

**Погрешность из-за неплоскостности электромагнитного поля в месте сличения антенн** возникает при сравнении двух антенн с различными характеристиками в неплоском поле и обусловлена различной реакцией этих антенн на неплоское поле. При правильном выборе расстояния и сличении двух неидентичных антенн, эффективная площадь которых отличается не более чем на 20 %, погрешность из-за неплоскостности электромагнитного поля обычно не превышает 2 %. Для получения меньшей погрешности необходимо увеличивать расстояние между антеннами.

**Погрешность измерения мощности измерителем мощности** определяется его метрологическими характеристиками. В составе эталона применен измеритель мощности РМ2 с комплектом термоэлектрических преобразователей, отградуированных непосредственно на исходном эталоне единицы мощности электромагнитных колебаний ИЭ РБ 19-10. Относительная погрешность измерения мощности измерителем мощности составила около 2 %.

**Погрешность замещения эталонной антенны на исследуемую** определяется погрешностью измерения расстояния между антеннами, высоты размещения и погрешностью наведения на максимум приема. Для малонаправленных антенн при условии, что поворотное устройство устройства осуществляют поворот антенны с погрешностью установки не хуже 1°, суммарная погрешность замещения обычно не превышает 1,5 %.

**Заключение.** Работы по исследованиям характеристик эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля ведутся постоянно. Применение поправочного множителя с учетом комплексных коэффициентов отражения в состав эталона позволило снизить погрешность из-за несогласования в СВЧ тракте эталона единицы ППЭ в 8–9 раз, а неисключенную систематическую погрешность эталона единицы ППЭ в целом в диапазоне частот от 0,3 до 6,0 ГГц и от 37,5 до 39,65 ГГц – в 1,5–2,0 раза. Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности эталона на данном этапе составляет 11–12 %. Очередным этапом станет завершение работ по определению эффективной площади эталонных антенн методом трех антенн, что позволит ещё улучшить его точностные характеристики.

1. Правила хранения и применения Национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15.
2. Мелехов М.Е., Иващенко П.А. Проверка средств измерений напряженности электромагнитного поля: учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1986 г.
3. Вольнец А.С. Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля // Метрология и приборостроение.- 2016.- №2.
4. А.С. Вольнец, А.В. Гусинский, А.М. Кострикин. Повышение точностных характеристик национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля за счет уменьшения погрешности из-за несогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте // Метрология и приборостроение.- 2017.- №1
5. IEEE Std 149™-1979 (R2008) (Revision of IEEE Std 149-1965) IEEE Standard Test Procedures for Antennas – 129 с.
6. Безэховые камеры СВЧ / М. Ю. Мицмакер, В. А. Торгованов, 129 с. ил. 21 см., М. Радио и связь 1982.
7. ГОСТ 8.381-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей.
8. ГОСТ CISPR 16-1-4-2016 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Ч. 1–4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех.

УДК 006.86:616.12-088-71 (047)(476)

## СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БИОПОНЕНЦИАЛОВ СЕРДЦА

Козак О.Г.

Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

В статье проведен анализ современных приборов, применяемых в электрокардиографии, для диагностики болезней и патологии сердца,

рассмотрены методы испытаний и проверки приборов для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Проведен обзор

международных стандартов и технических нормативных правовых актов, действующих на территории Республики Беларусь, в области электрокардиографии, проанализированы современные достижения науки и техники, предложено провести актуализацию СТБ 8010-99.

**Введение.** В наше время из-за ухудшения состояния экологии широко распространены заболевания сердца. Причем все чаще такие заболевания и отклонения встречаются среди молодых людей. Поэтому очень важно заблаговременно зафиксировать и распознать их. Именно этими вопросами и занимается такая наука как кардиография.

Работа сердца как биофизической системы сопровождается генерированием внутри организма, на поверхности и за его пределами электрических, магнитных и механических (акустических) полей, что в своей пространственно-временной структуре отражает функциональное состояние сердечно-сосудистой системы человека и позволяет проводить ее диагностику. Появление и интенсивное развитие высокочастотной электрокардиографии, кардиографии высокого разрешения и других новых функциональных методов исследования состояния сердца на ЭВМ указывают на необходимость и принципиальную возможность повышения точности, информативности автоматизированной компьютерной диагностики по зарегистрированным кардиосигналам.

Современная диагностика сердечных заболеваний не может обойтись без электрокардиографического исследования, представляющего собой анализ зарегистрированной кривой изменения биопотенциалов сердца.

**Анализ методов испытаний приборов для измерения биоэлектрических потенциалов сердца**

ГОСТ 19687-89 «Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Общие технические требования и методы испытаний». Стандарт распространяется на приборы для измерения и регистрации биоэлектрических потенциалов сердца – электрокардиографы и электрокардиоскопы, используемые в диагностических целях.

Основные наименования параметров приборов:

- диапазон входных напряжений  $U$ , мВ;
- относительная погрешность приборов при измерении напряжения  $\delta_U$ , %;
- нелинейность, %;
- чувствительность  $S$ , мм/мВ;
- относительная погрешность приборов при установке чувствительности  $\delta_S$ ;
- эффективная ширина записи (изображения), мм;
- входной импеданс  $Z_{вх}$ , МОм;
- коэффициент ослабления синфазных сигналов  $K_c$ ;
- напряжение внутренних шумов, приведенных ко входу,  $U_{ш}$ , мкВ;
- постоянная времени  $\tau$ , с;

- неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ)  $\delta_f$ , %;
- относительная погрешность приборов при измерении интервалов времени  $\delta_t$ , %.

Проверку диапазона входных напряжений проводят в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1, следующим образом: на вход прибора при чувствительности 20 мм/мВ подают гармонический сигнал частотой 10 Гц  $\pm 2\%$  размахом 30 мкВ  $\pm 10\%$  таким образом, чтобы изображение сигнала находилось в пределах эффективной ширины записи. Форма сигнала на записи (изображение) канала должна соответствовать форме входного сигнала; при чувствительности прибора 5 мм/мВ проводят запись (получают изображение) сигнала размахом 5 мВ  $\pm 3\%$ . Изображение сигнала не должно иметь видимых искажений.

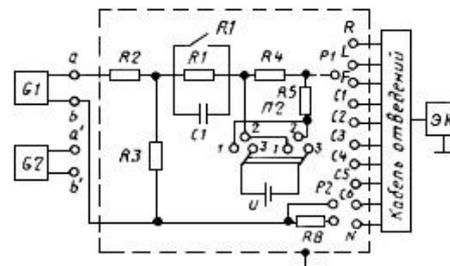


Рисунок 1 – Схема проверки диапазона регистрируемых сигналов, погрешности приборов при установке чувствительности, погрешности приборов при измерении напряжения, погрешности приборов при измерении интервалов времени, погрешности прибора при регистрации калибровочного сигнала, постоянной времени, АЧХ

Проверку относительной погрешности приборов при измерении напряжения проводят в каждом канале в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1 одновременной подачей на вход прибора постоянного напряжения  $\pm (300 \text{ мВ} \pm 10\%)$  и подачей на соответствующий вход прибора меандра частотой 10 Гц  $\pm 2\%$ , размахом согласно таблице 1 с погрешностью  $\pm 3\%$ .

Таблица 1

Размах входного сигнала, мВ	Устанавливаемая чувствительность, мм/мВ
0,4; 2; 4	5
0,2; 1; 2	10
0,1; 0,5; 1	20

Относительную погрешность прибора при измерении напряжения ( $\delta_U$ ) в процентах вычисляют по формуле

$$\delta_U = \frac{U_{изм} - U_{ex}}{U_{ex}} \cdot 100,$$

где  $U_{изм} = \frac{h_{изм}}{S_{ном}}$  – размах измеренного прибором напряжения, мВ;  $U_{вх}$  – размах напряжения, подаваемого на вход прибора, мВ;  $h_{изм}$  – линейный размер размаха регистрируемого сигнала, мм;  $S_{ном}$  – номинальное значение установленной на приборе чувствительности, мм/мВ.

Проверку нелинейности и эффективной ширины записи (изображения) проводят в каждом регистрирующем канале в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2, одновременной подачей на вход прибора гармонического сигнала частотой  $40 \text{ Гц} \pm 2 \%$  и такой амплитудой, чтобы получить размах сигнала на записи (изображение) в центре эффективной ширины – 10 мм и сигнала прямоугольной формы частотой  $2 \text{ Гц} \pm 5 \%$  с амплитудой, которую плавно (или дискретно) увеличивают для смещения регистрируемого сигнала из центра до краев эффективной ширины записи (изображения).

Размах регистрируемого гармонического сигнала при его смещении из центра к краям (но не выходя за них) эффективной ширины не должен изменяться более чем на  $\pm 1,0 \text{ мм}$ . Измерения повторяют при наличии на соответствующем проверяемому каналу входе постоянного напряжения  $\pm (300 \text{ мВ} \pm 10 \%)$ . Нелинейность ( $n$ ), в процентах, вычисляют по формуле

$$n = \frac{h_{\text{ном}} - h_{\text{изм}}}{B} \cdot 100,$$

где  $h_{\text{ном}}$  – номинальный размер размаха сигнала на записи (изображении), мм;  $B$  – эффективная ширина записи (изображения), мм.

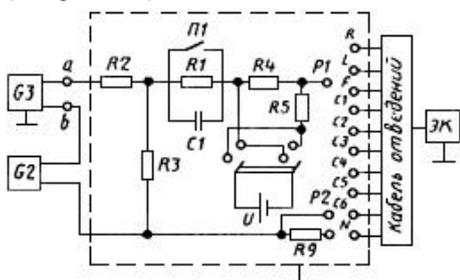


Рисунок 2 – Схема проверки нелинейности и эффективной ширины записи (изображения) канала

Проверку неравномерности АЧХ проводят подачей на вход прибора гармонического сигнала размахом  $1 \text{ мВ} \pm 1,5 \%$  в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.

Неравномерность АЧХ в полосе частоты (0,5–60) Гц и (60–75) Гц, в процентах, вычисляют по формуле

$$\delta_f = \frac{h_{\text{max}} - h_0}{h_0} \cdot 100,$$

где  $h_0$  – размер размаха изображения синусоиды на записи (экране) на опорной частоте  $f=10 \text{ Гц}$ , мм;  $h_{\text{max}}$  – размер размаха изображения синусоиды на записи (экране), максимально отличающийся от  $h_0$  в положительную и отрицательные стороны, мм.

Проверку относительной погрешности приборов при измерении интервалов времени  $\delta_t$  проводят путем подачи на вход прибора согласно схеме, приведенной на рисунке 1 сигнала прямоугольной формы размахом  $0,5 \text{ мВ} \pm 3 \%$ . Частоту следования сигнала с погрешностью  $\pm 1,5 \%$  выбирают равной 0,1 номинального значения уста-

новленной скорости (25 или 50) мм/с. Записывают не менее 20 периодов на скоростях (25 и 50) мм/с. Допускается при малой длительности записи регистрировать меньшее число периодов. В любом удобном месте записи измеряют поочередно один, пять и десять полупериодов записанного сигнала.

Относительную погрешность приборов при измерении интервала времени  $\delta_t$  в процентах вычисляют по формуле

$$\delta_T = \frac{T_{\text{изм}} - T_{\text{ном}}}{T_{\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{l_{\text{изм}} - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где  $l_0$  – отрезок носителя записи (развертки), мм, соответствующий интервалам времени  $T_{\text{ном}} = 0,1 \text{ с}; 0,5 \text{ с}; 1,0 \text{ с}$  ( $l_0 = 5, 25, 50 \text{ мм}$ );  $l_{\text{изм}}$  – измеренный отрезок записанного сигнала, содержащий соответственно 1, 5 и 10 полупериодов сигнала, мм, соответствующих измеренным интервалам  $T_u = 0,1 \text{ с}; 0,5 \text{ с}; 1,0 \text{ с}$ .

Проверку погрешности приборов при установке чувствительности проводят подачей на вход прибора гармонического сигнала частотой  $10 \text{ Гц} \pm 2 \%$  и размахом  $2 \text{ мВ} \pm 1,5 \%$  при чувствительности  $10 \text{ мм/мВ}$  в соответствии со схемой рисунок 13. Записывают 5 периодов входного сигнала. Измерения повторяют для чувствительностей 20 и 5 мм/мВ и входных сигналов с размахом 1 и 4 мВ  $\pm 1,5 \%$  соответственно.

Относительную погрешность приборов при установке чувствительности в процентах вычисляют по формуле

$$\delta_S = \frac{S_{\text{ном}} - S_{\text{изм}}}{S_{\text{изм}}} \cdot 100,$$

где  $S_{\text{изм}} = \frac{h_{\text{изм}}}{U_{\text{вх}}}$  – измеренное значение чувствительности, мм/мВ.

Проверку входного импеданса  $Z_{\text{вх}}$  проводят по каждому отводящему электроду при наличии на проверяемом входе прибора постоянного напряжения  $\pm (300 \text{ мВ} \pm 10 \%)$ , в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3, с последовательно включенным импедансом  $Z_2$  и без него.

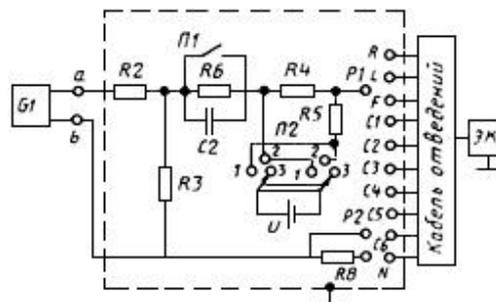


Рисунок 3 – Схема проверки входного импеданса

На вход прибора подают гармонический сигнал частотой  $10 \text{ Гц} \pm 2 \%$  и размахом  $2 \text{ мВ} \pm 3 \%$ . Затем измеряют линейный размер размаха регистрируемого сигнала  $H_{U1}$  в миллиметрах без

последовательно включенного импеданса  $Z_2$  и линейный размер размаха регистрируемого сигнала  $H_{U1}$  в миллиметрах при последовательно включенном импедансе. Входной импеданс ( $Z_{вх}$ ), кОм, вычисляют по формуле

$$Z_{вх} = Z_2 \left| \frac{H_{U2}}{H_{U1} - H_{U2}} \right|.$$

Значение  $Z_2$  должно быть не менее  $\frac{1}{3} Z_{вх}$ , установленного в технических условиях на приборы конкретного типа.

Проверку коэффициента ослабления синфазных сигналов ( $K_c$ ) проводят в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4, подавая от генератора гармонический сигнал частотой 50 Гц  $\pm 5\%$ , имеющий среднеквадратическое значение напряжения  $20 \text{ В} \pm 3\%$ .

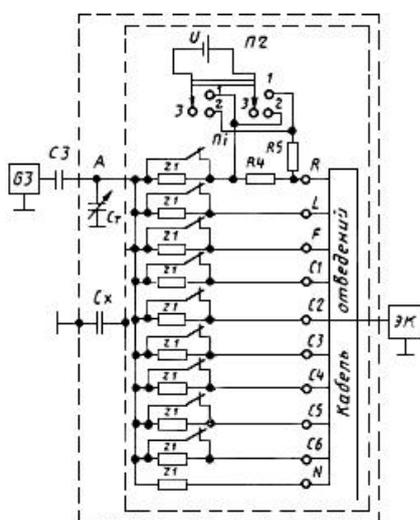


Рисунок 4 – Схема определения коэффициента ослабления синфазных сигналов

Емкость  $C_7$  регулируют таким образом, чтобы суммарная емкость  $C_m + C_x$  равнялась  $C_3$ , что соответствует установлению напряжения в точке  $A$ , равным  $10 \text{ В} \pm 10\%$ . Это условие проверяют на частоте сигнала 5 кГц  $\pm 10\%$  при отключенном приборе вольтметром с входным импедансом не менее 2 МОм.

При проверке  $K_c$  допускается подавать сигнал меньшего напряжения (в точке  $A$  устанавливают напряжение, равное половине подаваемого от генератора) при условии, что максимальный сигнал будет замечен при регистрации.

Затем отсоединяют вольтметр, подключают прибор и регистрируют сигнал частотой 50 Гц по всем отведениям, размыкая поочередно переключатель  $\Pi_i$ , оставляя остальные переключатели в замкнутом положении.

Проверку проводят при одновременной подаче постоянного напряжения  $\pm (300 \text{ мВ} \pm 10\%)$  на соответствующий вход проверяемого канала.

Коэффициент ослабления синфазных сигналов для максимального зарегистрированного сигнала вычисляют по формуле

$$K_c = \frac{U_c}{h_{изм}} \cdot S_{ном} \cdot 10^3,$$

где  $U_c$  – размах напряжения в точке  $A$  при отключенном кабеле отведений,  $B$  ( $U_c = 2\sqrt{2} \cdot 10$ ).

Проверку напряжения внутренних шумов, приведенного ко входу  $U_{ш}$ , проводят при чувствительности 20 мВ/мм и скорости носителя записи (развертки) 50 мм/с. Регистрацию проводят в течение 10 с при подключенных  $Z_1$  ко входам прибора рисунок 4 при отключенных генераторе  $G_3$  и конденсаторе  $C_3$ , при заземленной точке  $A$  и разомкнутом переключателе  $\Pi_3$ .

Для приборов с автоматической коммутацией отведений допускается проводить измерения в течение меньшего времени – времени регистрации одного отведения.

Напряжение внутренних шумов ( $U_{ш}$ ) в микровольтах, приведенное ко входу, вычисляют по формуле

$$U_{ш} = \frac{h_{изм.ш}}{S_{ном}} \cdot 10^3,$$

где  $h_{изм.ш}$  – измеренный на записи линейный размер максимального размаха шума, исключая ширину линии записи, мм (не учитывают единичные выбросы размахом более 1,5 мм, появляющиеся реже одного раза в секунду);  $S_{ном}$  – номинальное значение установленной чувствительности, мм/мВ.

Проверку постоянной времени  $\tau$  проводят в каждом канале при чувствительности 5 мм/мВ подачи на вход прибора сигнала прямоугольной формы размахом  $4 \text{ мВ} \pm 3\%$  длительностью не менее 5 с. Постоянную времени определяют по записи (изображению) как время затухания сигнала до уровня 0,37 согласно рисунку 5 без учета выбросов.

Изображение переходной характеристики на записи для каждого канала должно быть монотонным, обращенным в сторону нулевой линии.

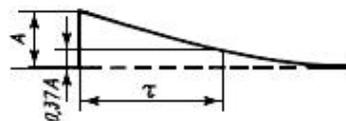


Рисунок 5 – Определение постоянной времени

#### Сравнительный анализ международных стандартов и технических нормативных правовых актов, действующих на территории РБ, в области электрокардиографии

В таблице 2 приведен сравнительный анализ ТНПА, действующих в разных странах, на методику поверки электрокардиографов.

Основными целями актуализации государственного стандарта СТБ «Система обеспечения

единства измерений Республики Беларусь. Электрокардиографы. Методика поверки» являются:

- установление единых требований к методикам поверки электрокардиографов в виде ТНПА в соответствии с Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации»;
- обеспечение современного научного и технического уровня ТНПА на методики поверки средств измерений и поддержание в актуальном состоянии нормативной базы ТНПА в области обеспечения единства измерений.

Таблица 2

Наименование поверяемой характеристики электрокардиографа	СТБ 8010-99	Р 50.2.009-2011	OIML R 90:1990
Определение диапазона входных напряжений и относительной погрешности приборов при измерении напряжения	+	+	+
Определение относительной погрешности приборов при установке чувствительности	+	-	+
Определение относительной погрешности приборов при измерении интервалов времени	+	+	+
Определение относительной погрешности приборов при установке скорости носителя записи	+	-	+
Определение постоянной времени	+	+	+
Определение неравномерности АЧХ	+	+	+
Определение входного импеданса	+	-	+
Определение относительной погрешности приборов при регистрации калибровочного сигнала	+	+	+
Определение напряжения внутренних шумов, приведенных ко входу	+	+	+
Определение коэффициента ослабления синфазных сигналов	+	-	+
Определение постоянного тока в цепи пациента	+	-	-
Определение идентичности формы сигнала и измерение его амплитудно-временных параметров	-	+	-
Определение сдвига сигналов между каналами	-	+	-
Определение диапазона и погрешности приборов при измерении частоты сердечных сокращений	-	+	-
Определение погрешности приборов при измерении уровня сегмента ST	-	+	-
Определение выброса	-	-	+
Определение ширины базовой линии, дрейфа базовой линии	-	-	+
Определение коэффициента взаимных помех	-	-	+
Примечание: + параметр проверяется; - параметр не проверяется			

Для достижения поставленных целей при актуализации государственного стандарта на методику поверки электрокардиографов должны быть решены следующие задачи:

- проведение анализа соответствующих требований к объекту стандартизации и обоснование необходимости разработки государственного стандарта на методику поверки;
- разработка единой методики поверки на электрокардиографы на основе проведенного анализа с учетом современных достижений науки и техники.

При установлении процедур поверки будет предусмотрен достаточный объем контроля метрологических и технических характеристик, который позволит оценить соответствие электрокардиографов установленным требованиям с заданной достоверностью, для чего целесообразно внести следующие изменения в СТБ 8010-99:

- исключить пункты поверки: определение относительной погрешности приборов при установке чувствительности и относительной погрешности приборов при установке скорости носителя записи, так как относительная погрешность приборов при измерении интервалов времени обеспечивает соответствие выше перечисленных параметров требованиям стандарта и является значимым параметром т.к. при постановке диагноза врач оперирует амплитудно-временными параметрами морфологии QRS комплекса электрокардиосигнала;

- исключить пункты поверки: определение входного импеданса, т.к. современные электрокардиографы имеют значение входного импеданса больше 10 МОм, а по ГОСТ 19687-89 «Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Общие технические требования и методы испытаний» входной импеданс должен быть не менее 5 МОм. В Р 50.2.009-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Электрокардиографы, электрокардиокопы и электрокардиоанализаторы. Методика поверки» этот пункт поверки отсутствует;

- при определении относительной погрешности приборов при измерении напряжения подавать на вход электрокардиографа можно меандр как указано в СТБ 8010-99, так и гармонический сигнал;

- при определении неравномерности амплитудно-частотной характеристики необходимо расширить полосу частот, т.к. все современные электрокардиографы имеют полосу частот от 0,05 до 150 Гц. В ГОСТ 19687-89 диапазон частот от 0,5 до 75 Гц;

- добавить пункт определение диапазона и абсолютной погрешности приборов при измерении частоты сердечных сокращений (ЧСС), т.к. все современные электрокардиографы измеряют ЧСС и этот параметр надо контролировать.

- пункт «Определение постоянного тока в цепи пациента» исключать не следует, так как данное

испытание регламентирует максимальное допустимое значение дополнительного тока в цепи пациента. В случае превышения допустимого значения дополнительного тока в цепи пациента возникает вероятность опасности для жизни пациента; вплоть до возникновения фибрилляции желудочков или нарушения нагнетательного действия сердца.

**Определение возможности актуализации технических нормативных правовых актов, действующих на территории Республики Беларусь, которые распространяются на электрокардиографы**

Требования к средствам измерений, предназначенных для испытаний и поверки электрокардиографов, устанавливаются в нормативных документах, например:

ГОСТ 19687-89 Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Общие технические требования и методы испытаний.

ГОСТ 25995-83 Электроды для съема биоэлектрических потенциалов. Общие технические требования и методы испытаний.

ГОСТ 30324.25-95 Изделия медицинские электрические. Часть 2. Частные требования безопасности к электрокардиографам.

ГОСТ 30324.27-95 Изделия медицинские электрические. Часть 2. Частные требования безопасности к электрокардиографическим мониторам.

СТБ 8010-99 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Электрокардиографы. Методика поверки.

В БелГИМ поверка электрокардиографов осуществлялась с помощью устройства коммутирую-

щего, предназначенного для коммутации электрокардиографа и генератора ГФ-05. БелГИМ приобретен генератор сигналов пациента Fluke ProSim8 для поверки электрокардиографов и мониторов пациента. Генератор позволяет быстро и просто осуществить проверку целого ряда медицинских приборов. ProSim 8 может воспроизводить сигналы ЭКГ, инвазивного и неинвазивного кровяного давления, реографический сигнал, сигнал температуры и сатурации кислорода. Генератор имеет самые большие диапазоны сигналов с наименьшими шагом и погрешностью воспроизведения, что делает его самым точным в классе мультифункциональных генераторов сигналов пациента, имеются также дополнительные возможности, такие как синхронизация различных видов сигналов и возможность задания автоматических последовательностей и предустановок.

**Выводы:**

– проведен анализ современных приборов, применяемых в электрокардиографии, для диагностики болезней и патологии сердца;

– рассмотрены методы испытаний приборов для измерения биоэлектрических потенциалов сердца;

– сделан обзор международных стандартов и технических нормативных правовых актов, действующих на территории Республики Беларусь, в области электрокардиографии;

– проанализировав замечания и предложения организаций, изготавливающих электрокардиографы, и учитывая современные достижения науки и техники, необходима актуализация СТБ 8010-99.

УДК 006.053

**ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА ПРОЕКТА ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ФОКУС-ГРУППЫ**

**Серенков П.С., Войнич К.Э., Бужан И.А.**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Республика Беларусь*

Анализ существующей ситуации в стандартизации показал, что около 30 % разработанных государственных стандартов отменяются в течение четырех лет после утверждения, еще около 15 % – 20 % – по результатам первого пересмотра. Существуют сложности обеспечения необходимого уровня качества стандарта, которые заключаются в следующем:

- процесс разработки стандарта – аутсорсинговый процесс для основного заказчика государственных стандартов, которым является чаще всего Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь;

- разработчик не всегда достаточно компетентен в нормируемой области, являясь исключительным специалистом в вопросах непосредственной стандартизации либо, являясь

специалистом в предметной области, не посвящен в нюансы работ по разработке государственных стандартов Республики Беларусь;

- представители заинтересованных сторон не всегда достаточно мотивированы, компетентны и способны однозначно формулировать свои замечания и предложения при написании отзывов на получаемые проекты стандартов;

- процесс разработки осложняется ограничениями установленными сроками разработки, финансовыми средствами, числом разрешенных рассылок проекта стандарта на отзыв и т.д.

Согласно закона Республики Беларусь [1] стандарт – документ, разработанный в процессе стандартизации на основе согласия большинства заинтересованных субъектов технического нормирования и стандартизации и содержащий

технические требования к объектам стандартизации.

Проработав различные варианты формирования первой редакции проекта стандарта, наилучшим является вариант, представленный на рис. 1, который заключается в том, что модератор формирует фокус-группу, состоящую из представителей поставщиков, потребителей, третьих сторон, государственных структур, заинтересованных в разработке государственного стандарта. В качестве модератора выступает инженер по стандартизации организации, ответственный за разработку проекта стандарта.



Рисунок 1 – Алгоритм разработки проекта стандарта

Преимущества данного варианта:

- репрезентативность выборки заинтересованных лиц;
- объективное и всестороннее рассмотрение нормируемого объекта;
- непротиворечивость требований;
- формирование первой редакции на основе актуальной информации и т.д.

Вовлечение фокус-группы в данный процесс привносит качественно иное содержание процесса и предполагает альтернативные варианты организации работы. Члены фокус-группы выступают в роли консультантов модератора.

Основное назначение фокус-группы - повысить информативность исходных данных для разработки первой редакции проекта стандарта. Фактор информативности разработчика включает два аспекта:

- актуализированная, комплексная информация собственно об объекте стандартизации,
- объективная информация о мнениях заинтересованных сторон (степени консенсуса), поскольку при стандартизации консенсус является ключевым механизмом.

Нами разработана методика формирования состава фокус-группы, как репрезентативной выборки массива заинтересованных лиц Республики Беларусь (представителей поставщиков, потребителей, третьих сторон, государственных структур). В данной статье мы акцентируем внимание на организацию взаимодействия модератора с участниками фокус-группы.

Предложено решение данной задачи - модульная организация работы с фокус-группой, в основу которой положен специальный опрос участников. Первая редакция проекта стандарта формируется на основе полученных результатов опроса.

Формирование проекта первой редакции стандарта реализуется в виде иерархически взаимосвязанных сессий (рис. 2). Каждая сессия – процесс взаимодействия модератора с фокус-группой. Объект одной сессии на любом уровне иерархии – отдельно взятый модуль. Отдельно взятый модуль – фрагмент проекта первой редакции стандарта, представляющий его простейший структурный элемент (единичную декомпозицию типа «части – целое»).

Модульный подход в такой интерпретации – реализует **фрактальную структуру** проекта стандарта, которая обеспечивает главное преимущество такого подхода: проработка **единичного фрактала**, т.е. разработка и валидация типовой методики проведения сессии (в рамках одного модуля), позволит избежать серьезных ошибок при формировании модулей на всех уровнях иерархии и, как следствие, всего проекта стандарта. Таким образом, результативность процесса разработки первой редакции проекта стандарта не зависит от объема и сложности документа.

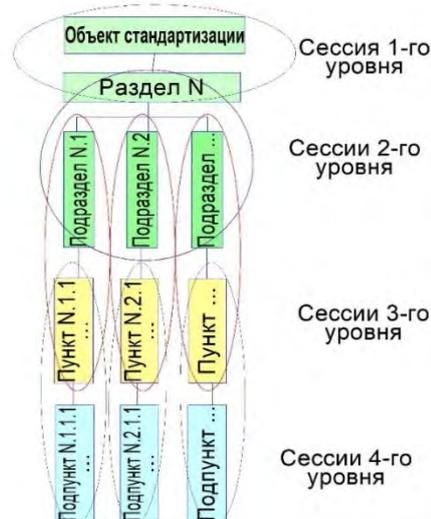


Рисунок 2 – Разработка проекта стандарта как иерархия сессий (работы с фокус-группой)

Организация работ с фокус-группой включает 2 этапа:

- 1 этап - подготовительный. На данном этапе модератором осуществляется поиск информации об объекте стандартизации, анализ требований к объекту, а также определение статуса участников фокус-группы;

- 2 этап - опрос членов фокус-группы (сессия *i*-го уровня) по каждому модулю будущего проекта стандарта.

Логика работы на данном этапе заключается в том, что проект государственного стандарта прорабатывается поэтапно.

Сессия 1-го уровня иерархии - проект стандарта как модуль делится на разделы. Сессии 2-го уровня иерархии (количество равно числу разделов) - каждый раздел прорабатывается как отдельный модуль в подразделы. Затем проводятся сессии 3-го уровня иерархии - каждый подраздел прорабатывается в пункты. Завершают работу сессии 4-го уровня иерархии - каждый пункт прорабатывается в подпункты. Т.е. происходит поэтапная декомпозиция информации об объекте стандартизации.

В зависимости от наличия информации, собранной на 1 этапе, каждая сессия может быть реализована в виде модуля А, либо модуля В.

Модуль А включает следующие шаги:

- разработка и рассылка анкет для участников фокус-группы;
- обобщение данных анкетирования и принятие решение по структуре и параметрам стандарта;
- организация и проведение дополнительного опроса (при необходимости).

Модуль В включает следующие шаги:

- генерирование структуры и параметров стандарта методом мозгового штурма участниками фокус-группы;

- разработка и рассылка анкет для участников фокус-группы;

- обобщение данных анкетирования и принятие решение по структуре и параметрам стандарта;

- организация и проведение дополнительного опроса (при необходимости).

Модуль А выбирается в случае, когда модератор сформулировал для себя представление об объекте стандартизации. Фокус-группа необходима для оценки консенсуса. Модуль В – в случае, когда модератор не имеет представления об объекте стандартизации. Фокус-группа необходима для генерирования такого представления и оценки консенсуса.

Организованный с помощью фокус-группы процесс формирования «скелета» первой редакции проекта государственного стандарта находится в управляемых условиях, позволяет гарантировать тот факт, что первая редакция стандарта будет иметь консенсус при рассылке ее на отзыв.

1. Закон Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» № 437-3 от 26 октября 2016 г.

УДК 536.5.082(045)(476)

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Стрельчук Е.Н.

*Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь*

Температура является одним из важнейших параметров, требующих высокой точности измерения как на производстве, так и в быту. И в настоящее время эти требования постоянно растут.

Для обеспечения высокоточных измерений на территории Республики Беларусь в период с 1993 г. по 1995 г. в НПО "ВНИИМ" им. Д.И. Менделеева» и Минском центре стандартизации, метрологии и сертификации Республики Беларусь был разработан, создан и исследован эталон единицы температуры.

В период с 2006 г. по 2008 г. в соответствии с заданием 1.3 "Модернизировать Национальный эталон единицы температуры – кельвин" подпрограммы "Эталоны Беларуси" государственной научно-технической программы "Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований" проведена модернизация эталона. В результате проведенной работы был создан современный эталон, соответствующий международным требованиям и имеющий метрологические характеристики на уровне лучших мировых достижений в области контактной термометрии.

В настоящее время в состав эталона единицы температуры входят следующие средства измерений:

- 1 Ампулы реперных точек:
  - тройной точки ртути (минус 38,8344 °С);
  - тройной точки воды (0,01°С), внешний вид представлен на рисунке 1;
  - точки плавления галлия (29,7646 °С);
  - точки затвердевания индия (156,596 °С);
  - точки затвердевания олова (231,928 °С);
  - точки затвердевания цинка (419,527 °С);
  - точки затвердевания алюминия (660,323 °С), внешний вид представлен на рисунке 2;
  - точки затвердевания серебра (961,78 °С);
- 2 Прецизионный термометрический мост F18;
- 3 Комплект эталонных мер электрического сопротивления Tinsley;
- 4 Группа платиновых термометров сопротивления – рабочие эталоны;
- 5 Прецизионный измеритель температуры Fluke 1590 Super Thermometer;
- 6 Термостатирующие устройства для поддержания ампул реперных точек:

- термостат низкотемпературный "Криостат ТТВ";
- устройство термостатирующее "Термостат АЗ" (Ga);
- устройство термостатирующее для поддержания реперной точки "точка затвердевания индия (In)";
- устройство термостатирующее для поддержания реперной точки "точка затвердевания олова (Sn)";
- термостатирующее устройство "Цинк-5";
- печи Fluke 9115A, Fluke 9116A – для поддержания ампул реперных точек затвердевания алюминия и серебра;
- термостат Fluke 7108 – для поддержания ампулы реперной точки ртути.



Рисунок 1 – Внешний вид ампулы тройной точки воды и вспомогательное оборудование

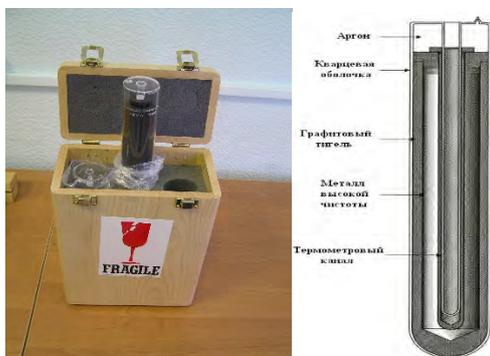


Рисунок 2 – Внешний вид и конструкция ампулы реперной точки затвердевания алюминия

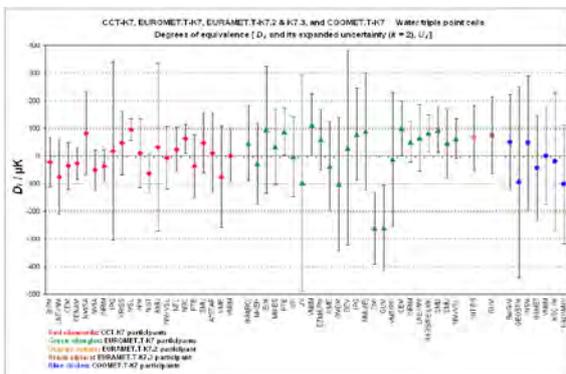


Рисунок 3 – Всемирный график степеней эквивалентности эталонов

Для исследования эквивалентности единицы температуры, реализуемой эталонами разных стран, проводятся международные ключевые сличения эталонов, организуемые консультативным комитетом по температуре (ККТ) при Международном бюро мер и весов (МБМВ). Для подтверждения метрологических характеристик Национального эталона единицы температуры Республики Беларусь и для оценки неопределенностей реализации температурной шкалы национальный эталон единицы температуры участвовал в сличениях в рамках КОOMET:

- "Региональные сличения национальных эталонов единицы температуры в диапазоне температур от тройной точки воды до температуры затвердевания цинка" № 285/RU-a/03, подтверждена эквивалентность эталона в реперных точках затвердевания олова (231,928 °C) и цинка (419,527 °C);
- "Региональные сличения ампул тройной точки воды национальных эталонов единицы температуры" №395/BY-a/07.

Таблица 1

№ измерения	Измеренное значение сопротивления эталонного термометра сопротивления в ТТВ, Ом
1	25,024995
2	25,024987
3	25,025028
4	25,024997
5	25,025001
6	25,025030
7	25,025003
8	25,025035
9	25,025039
10	25,025003
11	25,025039
12	25,025037
13	25,025037
14	25,025048
15	25,025048
СКО, мК	0,15

В результате участия в данных сличениях Национальный эталон единицы температуры Республики Беларусь представлен на всемирном графике степеней эквивалентности эталонов, приведенном на рисунке 3.

В настоящее время разработаны обновленные версии методик экспертизы (Review Protocols) в области термометрии, которые являются основными документами, для оценки возможности опубликования представляемых СМС на сайте МБМВ. В соответствии с вышеуказанным документом в некоторых случаях решение о возможности введения СМС данных в базу МБМВ принимается региональной организацией, однако окончательное заключение вырабатывается на заседании рабочей группы WG-8 ККТ, где рассматриваются результаты экспертизы измерительных возможностей.

В настоящее время по результатам данных сличений БелГИМ опубликовано 37 строк СМС-данных.

В соответствии с МТШ-90 основной величиной, используемой для расчета температуры, измеренной с помощью платинового термометра сопротивления, является  $W(t)$  - отношение его сопротивления при измеряемой температуре к сопротивлению при температуре ТТВ. Следовательно, достоверность и воспроизводимость температурной шкалы в целом определяется достоверностью воспроизведения температуры ТТВ.

Результаты исследований стабильности поддержания температуры ТТВ приведены в таблице 1.

Исследования проведены с помощью эталонного платинового термометра сопротивления ПТС-25 с номинальным сопротивлением в ТТВ 25 Ом.

Как видно из таблицы 1 СКО не превышает значения, заявленного в СМС-данных.

Благодаря национальному эталону единицы температуры в Республике Беларусь было налажено производство прецизионных средств измерений температуры, таких как измерители температуры эталонные (ИТЭ), а также решена проблема метрологического контроля прецизионных средств измерений температуры контактным методом зарубежного производства.

В настоящее время измерители температуры эталонные (ИТЭ) применяются для проведения измерений температуры с высокой точностью (до 0,01 °С) в органах ГМС, а также в метрологических лабораториях предприятий. Данные средства измерений не только улучшили качество метрологических услуг, но и позволили в ряде случаев отказаться от использования лабораторных ртутных стеклянных термометров.

УДК 006.91

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА В КОНТЕКСТЕ ПАРАДИГМЫ «INDUSTRIE 4.0»

Разумный А.И.<sup>1</sup>, Гуревич В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»  
Минск, Республика Беларусь

Мир стоит на пороге четвертой промышленной революции. Первая промышленная революция была вызвана властью над водой и паром для перехода от человеческого труда к механическому производству. Вторая промышленная революция основывалась на использовании электроэнергии и поточного производства для создания массового производства. Третья промышленная революция использовала электронику и информационные технологии для автоматизации производства. Четвертая – текущая тенденция автоматизации и обмена данными в технологиях производства.

Несмотря на то, что в Республике Беларусь еще сравнительно мало говорят о таких вещах как «Industrie 4.0», «Интернет вещей» (Internet of Things – IoT), киберфизические системы (Cyber-Physical Systems – CPS) и облачные вычисления (Big Data Mining), несколько стран с развитой экономикой уже реализуют концепцию «индустрии 4.0», обозначающую четвертую промышленную революцию, масштаб и характер изменений которой, по данным Всемирного экономического форума (ВЭФ), оценивается как беспрецедентный в истории человечества. Четвертая промышленная революция обладает огромным потенциалом для увеличения уровня жизни, производительности труда и темпам роста ВВП, повышения качества выпускаемой продукции, а так же энергоэффективности, эффективности использования ресурсов и защиты окружающей среды. Изменения, связанные с этим сдвигом парадигмы, затронут самые

разные стороны жизни, начиная от освобождения человека от рутинных типовых задач и заканчивая трансформацией экономики и рынка труда, изменениями в политических системах и социальным расслоением. Например, помимо работы по внедрению «Industrie 4.0» развивающиеся страны должны подготовиться к тому, что они столкнутся с последствиями ее реализации в странах с развитой экономикой. Некоторые из этих последствий связаны с уменьшением потоков прямых иностранных инвестиций и еще одним проявлением увеличивающегося технологического разрыва, что приведет к еще большему дефициту ВВП и, следовательно, большим различиям в плане благосостояния. Таким образом, если не воспользоваться преимуществами «Industrie 4.0», то данные проблемы значительно увеличиваются в своих масштабах.

Впервые термин «Industrie 4.0» и свое видение о будущем развитии промышленности было представлено правительством Германии на Ганноверской ярмарке в 2011 году, а уже два года спустя на том же месте правительство представило свою государственную программу «Industrie 4.0», в рамках которой предполагается, что крупные немецкие концерны при грантовой поддержке Федерального правительства будут проводить исследования и внедрять инновации в целях создания полностью автоматизированного «умного» производства (Smart Factory), линии и изделия на котором будут взаимодействовать друг с другом и потребителями в рамках концепции «Интернета вещей». Уже

сейчас компании внедряют инновационные решения, в том числе через «интернет вещей», облачные вычисления, миниатюризацию и трехмерную печать, которые позволят обеспечить большую совместимость и гибкость производственных процессов, автономное и интеллектуальное производство. Физические компоненты промышленного производства трансформируются посредством интеллектуальных цифровых сетей в киберфизические системы, что позволяет управлять производственными процессами и продуктами по индивидуальному заказу в режиме реального времени и на больших расстояниях [1].

Иными словами, идея «умного завода» станет возможной благодаря таким новациям, как «Industrie 4.0» и «Интернет вещей», что в свою очередь обеспечит взаимосвязь производственных процессов и их адаптацию к установленным условиям в реальном времени на основе действительных данных, поступающих от различных источников. В рамках модульной структуры «умного завода» киберфизические системы контролируют физические процессы, создавая виртуальную копию физического мира и делая децентрализованные решения в режиме реального времени [1].

При этом все, метрология, являющаяся неотъемлемой частью общей концепции «Industrie 4.0», отвечает за предоставление необходимых действительных данных для контроля качества продукции и производственных процессов и будет играть важную роль в предстоящем создании «умного завода».

Представление «Industrie 4.0» с точки зрения метрологического обеспечения заключается в повышении качества и максимальной скорости измерений и контроля прямо на производственной линии, что позволит повысить производительности, снизить время производственного цикла и другие связанные с этим затраты. В свою очередь это определяет новые тенденции в метрологии с точки зрения удовлетворения потребностей производственной среды и интеллектуальных процессов производства и измерений [2].

Метрологическое обеспечение станет полностью неотъемлемой частью производственного процесса, даже если не вся измерительная система физически встроена и будет интегрирована через подключенный поток данных в реальном времени. Автоматизация будет играть ключевую роль в задачах измерения, удаляя традиционные метрологические процедуры послепроизводственного контроля из производственного цикла. Измерения будут проводиться с помощью «умных» сенсоров и систем, интегрированных непосредственно в производственные процессы, обеспечивая адаптивное управление и реализацию корректировок и исправлений в режиме реального времени. Такие системы будут агрегировать и обрабатывать

информацию и в конечном итоге принимать решения, основанные на мониторинге наиболее важных функций процесса. Данные такого рода позволяют принимать решения в режиме реального времени всякий раз, когда эти критические параметры изменяются и влияют на конечный результат процесса. С другой стороны, «данные не равны информации». Поэтому необходимо разработать платформы действий и алгоритмы. Это алгоритмы, которые позволяют определить контрольные индикаторы для оценки данных и принятия решений. Это приведет к созданию базы данных, позволяющей производственным процессам прогнозировать любые неточности и действовать превентивно.

С точки зрения технологии, отдельные датчики заменяются распределенными сетями датчиков, поскольку сетевая инфраструктура является существенным изначальным условием для использования потенциала встроенных измерений с максимальной эффективностью. Таким образом, можно говорить о слиянии данных с нескольких разных датчиков, что приводит к комбинированному метрологическому результату. Инструменты анализа данных, такие как нейронные сети и другие методы машинного обучения, будут направлены на компенсацию ограниченных данных, полученных в отдельных точках путем объединения огромных наборов данных. Это будет означать, что поверхности сложных форм будут полностью охарактеризованы и анализ значений будет происходить на основе необходимой информационной достаточности.

Основные требования, которые должны выполняться для взаимодействия между датчиками и процессами, связаны с быстрым сбором данных (бесконтактные технологии), автоматической обработкой измерений (параметрическое программирование), интерпретацией результатов (модели принятия решений) и преобразованием полученных результатов (адаптация языка общения) для связи с системой мониторинга процесса и, в конечном счете, вмешательства.

Кроме того, одна из самых больших проблем связана с переносом прослеживаемости измерительных процедур «от лаборатории к производственной среде», где многие из факторов, которые контролируются в лаборатории (условия окружающей среды, калибровка датчика, и т. д.), не контролируются или даже неизвестны из-за того, что не было необходимости характеризовать их. Фактически, колебания температуры являются источником неопределенности, которая в наибольшей степени влияет на производственные и измерительные системы, а также на саму деталь. Чем больше температурные колебания и чем больше деталь, тем больше будут геометрические смещения системы и компонентов. Поэтому неопределенность в отношении производственных процессов и процессов измерения на месте производства больше [2].

В заключение можно сказать, что «Industrie 4.0» – это прежде всего оцифровывание промышленности, в частности производственных процессов, а также продуктов и услуг, получаемых от них. Оцифровка требует, чтобы метрология выходила за пределы лабораторий и переходила непосредственно к производственным процессам. Это план действий, в котором есть ряд возможностей, к которым метрология должна будет обратиться в ближайшем будущем, если она стремится стать помощником для «Industrie 4.0». Метрологическая деятельность в данном направлении должна включать в себя вопросы выполнения автоматической калибровки и обеспечения валидации данных, а также поддержания стабильности и надежности применяемых чувствительных элементов. Кроме

того, системы мониторинга, задействованные в организованном обмене информацией («Интернет вещей»), способны генерировать огромные объемы данных (Big Data). В этой связи все большая роль должна отводиться методам комплексного анализа данных в режиме реального времени, основанным на четких метрологических принципах и обеспечивающим достоверный уровень неопределенности.

1. Hermann, Pentek, Otto, 2016: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, accessed on 4 May 2016.
2. Heiner Lasi, Hans-Georg Kemper, Peter Fettke, Thomas Feld, Michael Hoffmann: Industry 4.0. In: Business & Information Systems Enginee.

УДК 519.23+519.25

## НОВЫЙ СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ СОВПАДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подригало М. А.<sup>1</sup>, Коробко А. И.<sup>2</sup>, Исакова Е. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

<sup>2</sup>Украинский научно-исследовательский институт прогнозирования и испытаний техники и технологий для сельскохозяйственного производства имени Л. Погорелого, Харьковский филиал  
Харьков, Украина

При проведении экспериментальных исследований важным является вопрос определения, на сколько полученные экспериментальные данные совпадают с теоретическими. Иначе говоря, насколько экспериментальное распределение данных отвечает теоретическому. Решение указанных задач базируется на основных положениях теории вероятности и математической статистики.

В докладе предложен новый способ оценивания совпадения теоретических и экспериментальных данных на основе методов математической статистики, используя в качестве показателя вероятность с которой совпадают теоретические и экспериментальные данные. Указанный показатель основан на предположении того, что теоретические и экспериментальные данные распределены нормально, а теоретическое распределение изменяется в пределах неопределенности измерения исследуемого параметра.

Вопросу исследования совпадения теоретических и экспериментальных распределений посвящено значительное количество работ, как фундаментальных пособий по теории вероятности и теории эксперимента, так и публикации по решению частных задач. Однако, следует заметить, что на сегодняшний день в известной литературе нет единого подхода к терминам и их определений по этому вопросу. В связи с этим возникают разногласия в трактовке отдельных понятий. Детальный анализ показателей и критериев для установ-

ления соответствия теоретического распределения экспериментальному осуществлен в работе [1]. Эти показатели имеют название «критерии согласования».

К недостаткам существующих критериев можно отнести следующее:

- они требуют наличия большой выборки;
- не в полной мере дают ответ на вопрос относительно того, на сколько (в количественном виде) совпадают теоретические и экспериментальные данные;
- косвенный (интегральный) учет метрологических характеристик измерений исследуемого параметра.

Для решения поставленной задачи воспользуемся оцениванием вероятности равенства нулю разности математических ожиданий величин полученных теоретическим и экспериментальным путем. Рассматривая результаты теоретического и экспериментального исследования как случайные величины, результат представим в виде композиции этих величин

$$|\bar{y}_t - \bar{y}_e| = k_p \sigma_{\text{ком}}, \quad (1)$$

где  $\bar{y}_t$ ,  $\bar{y}_e$  – математическое ожидание (оценки) результатов теоретического и экспериментального определения (измерения) параметру  $y$ , соответственно;  $k_p$  – квантиль нормального распределения композиции случайных величин;  $\sigma_{\text{ком}}$  – среднеквадратическое отклонение композиции случайных величин.

При проведении исследования были сделаны допущения о том, что  $y_T$  и  $y_e$  подчиняются нормальному закону. Это дает право рассматривать нормальный закон распределения композиции случайных величин ( $y_T, y_e$ ).

Экспериментальные данные описываются (как отмечалось выше) нормальным законом распределения.

Теоретические значения оценочного показателя являются функцией некоторых величин, которые входят в выражение для его определения

$$y_T = f(X \pm U_X), \quad (2)$$

где  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множество значений величин, которые входят в выражение для определения теоретического значения оценочного показателя  $y$ ;  $U_X = \{U_{X1}, U_{X2}, \dots, U_{Xn}\}$  – множество значений расширенной неопределенности (пределных границ абсолютных погрешностей) с которыми измеряются показатели  $X$ , что входят в выражение для определения оценочного параметра  $y$ ;  $n$  – количество величин, которые входят в выражение для определения оценочного показателя  $y$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что теоретическое значение величины оценочного показателя  $y$  изменяется в пределах  $y_T = [-U_y; +U_y]$ , где  $U_y$  – расширенная неопределенность (граница абсолютной погрешности) измерения показателя  $y$ .

Значение  $U_y$  может быть взято из априорных данных, свидетельства о калибровке или паспорта средства измерительной техники (при прямых измерениях), установленное в нормативном документе на метод измерений (испытаний), и тому подобное.

Математическое ожидание  $\bar{y}_T$  теоретического значения величины оценочного параметра будет равняться его теоретическому значению  $y_T$ .

Максимальное  $y_{Tmax}$  и минимальное  $y_{Tmin}$  теоретическое значение оценочного показателя будет определяться, соответственно

$$y_{Tmax}(y_{Tmin}) = \bar{y}_T \pm U_y. \quad (3)$$

Применяя правило «трех сигм» определим среднеквадратическое отклонение случайной величины  $y_T$  с учетом (3)

$$\sigma_{y_T} = \frac{U_y}{3}. \quad (4)$$

Среднеквадратическое отклонение композиции случайных величин

$$\sigma_{ком} = \sqrt{\sigma_{y_T}^2 + \sigma_{y_e}^2} \quad (5)$$

С (1) находим  $k_p$  с учетом (4) и (5)

$$k_p = \frac{|\bar{y}_T - \bar{y}_e|}{\sqrt{\frac{U^2}{9} + \sigma_{y_e}^2}} \quad (6)$$

Показатель  $k_p$  характеризует вероятность с которой теоретическая модель не соответствует экспериментальной. Для определения

вероятности с которой теоретическая модель будет соответствовать экспериментальной необходимо найти величину обратную  $k_p$

$$p_c = 1 - k_p. \quad (7)$$

Показатель  $p_c$  (probability coincidence) показывает какая часть теоретического распределения совпадает с экспериментальным и может выражаться в безразмерных единицах или в процентах.

Пределы изменения  $p_c$ :

- $p_c = [-\infty; 0]$  – распределения не совпадают полностью;
- $p_c = (0; 1)$  – распределения совпадают частично (с вероятностью от 0 до 1);
- $p_c = [1]$  – распределения совпадают полностью.

При проведении научных исследований, разработке новых методов испытаний и их моделей, на начальном этапе исследования достаточным можно считать совпадение на уровне  $p_c = [0,8; 1]$ . В дальнейшем результат может уточняться в зависимости от требований и потребностей. Графическая интерпретация показателя  $p_c$  показана на рис. 1.

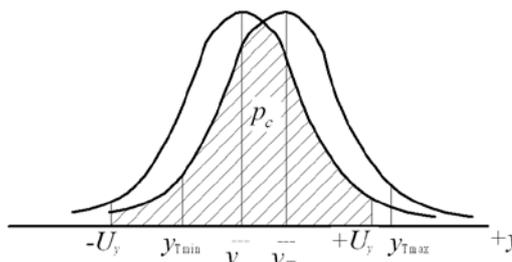


Рисунок 1 – Графическая интерпретация показателя  $p_c$  (probability coincidence)

В результате имитационного моделирования был получен вид поверхности по которой распределяются значения показателя  $p_c$  при разных значениях величин разницы математических ожиданий и среднеквадратических отклонений композиции законов распределения (рис. 2).

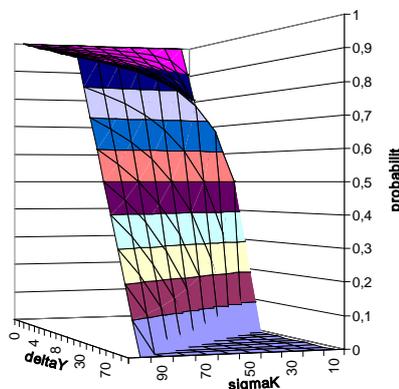


Рисунок 2 – Результаты моделирования совпадения теоретических и экспериментальных данных

**Выводы.** Разработанный показатель  $p_c$  (probability coincidence) совпадения теоретических и экспериментальных данных позволяет провести количественное оценивание адекватности теоретической математической модели данным эксперимента. Указанный показатель учитывает величину неопределенности измерения исследуемого показателя. Физическая суть –

вероятность совпадения теоретического и экспериментального распределения.

1. Лемешко Б. Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Монография / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. – Новосибирск : Издво НГТУ, 2011. – 888 с.

УДК 541.183

## МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ/НУКЛОН

Бринкевич Д.И.<sup>1</sup>, Лукашевич М.Г.<sup>1</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Харченко А.А.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Черный В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Трековые мембраны (ТМ) – пористые полимерные пленки с микронными или нанопорами – предназначены для прецизионного фильтрации микро- и наночастиц, включая бактерии, кровяные тельца. Они нашли широкое применение в медицине, в процессах фильтрации воздуха и жидкостей, фармацевтических препаратов и биологических сред, а так же в качестве шаблонов для получения наноструктур [1,2]. Существенное преимущество ТМ как фильтров – одинаковый размер пор, который можно варьировать в широких пределах изменяя время травления, тип травителя и т.д.

Основным материалом ТМ является полиэтилентерефталат (ПЭТФ). Мембраны на основе ПЭТФ достаточно прочны и термостойки, что позволяет использовать их в бортовой аппаратуре рентгеновских телескопов в условиях открытого космоса на околоземной орбите [3]. Для изготовления ПЭТФ-мембран широко используется облучение ионами благородных газов с энергиями в несколько мегаэлектрон-вольт [2,3].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния высокоэнергетичной имплантации инертных газов (Xe, Ar) на рельеф поверхности пленок полиэтилентерефталата.

Пленки ПЭТФ толщиной  $40 \pm 2$  мкм имплантировались ионами Ar и Xe с удельной энергией  $\sim 1$  МэВ/нуклон и дозами ( $\Phi$ ) от  $5 \cdot 10^8$  до  $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре на импульсном циклотроне ИЦ-9. Проецированный пробег ( $R_p$ ) ионов составлял  $\sim 20$  мкм. Плотность ионного тока варьировалась в интервале от 0,3 до 2,5 мкА/см<sup>2</sup>. Морфология поверхности полимерной плёнки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц на установке Solver P-47. Использовались кантилеверы серии NSG 01 с радиусом закругления 10 нм. Одновременно измерялась

среднеарифметическая шероховатость ( $R_a$ ) поверхности.

На рис.1 приведены типичные АСМ 3D изображения поверхностей пленок ПЭТФ, имплантированных ионами инертных газов с удельной энергией 1 МэВ/нуклон. АСМ-изображения как имплантированной, так и не-

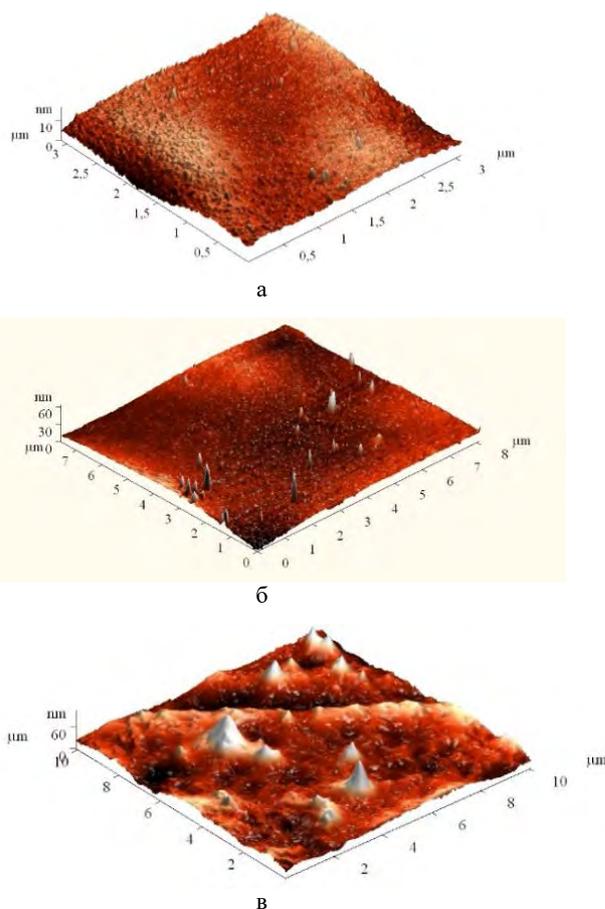


Рисунок 1 – АСМ 3D изображения поверхностей пленок ПЭТФ, имплантированных ионами Xe (а) и Ar (б, в) с удельной энергией 1 МэВ/нуклон

Доза, см<sup>2</sup>: а -  $5 \cdot 10^8$ ; б -  $5 \cdot 10^{15}$ ; в -  $1 \cdot 10^{17}$  имплантированной (обратной) поверхностей ПЭТФ пленки существенно не отличались. На них наблюдались хаотично расположенные конусообразные «вспучености» высотой до 70 нм и диаметром в основании до 100-200 нм (рис.1). С увеличением дозы размеры «вспученостей» - высота и диаметр в основании увеличиваются, а концентрация их на единицу поверхности снижается (сравни рис.1а,в). Так если при  $\Phi = 5 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup> плотность «вспученостей» составляла  $\sim 10$  мкм<sup>-2</sup>, высота менее 10 нм, а диаметр в основании  $\sim 50$  нм (рис.1а), то при  $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> плотность снижалась до  $(5-10) \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>-2</sup> при среднем диаметре в основании около 400 нм (рис.1в).

На имплантированной поверхности помимо «вспученостей» наблюдалось формирование волнистой поверхности с периодом  $\sim 1$  мкм и высотой около 20–30 нм (рис.1в). Формирование «волн» при имплантации может быть связано с частичной ориентацией и кристаллизацией полимерной пленки в процессе изготовления. С другой стороны, при облучении имеет место высокая локальная неоднородность процессов радиационно-индуцированной деструкции и сшивания полимеров [4]. Радиационные эффекты наиболее интенсивно проявляются в аморфных областях, что при облучении частично ориентированных полимеров приводит к формированию «волн» на поверхности.

Конусообразные «вспучености» наблюдаются не только при ионной имплантации, но и при других видах высокоэнергетического воздействия, например, при  $\gamma$ -облучении полимеров [5]. Кроме того, они могут формироваться за пределами области высокоэнергетического воздействия. Так, в работе [6] при облучении пленок ПЭТФ толщиной 3,8 мкм вакуумно-ультрафиолетовым излучением в спектральном диапазоне 115–135 нм наблюдалось формирование подобных конусообразных структур на обратной (не облучаемой) стороне пленки. Вероятнее всего, их формирование обусловлено релаксацией полей упругих напряжений при внешнем высокоэнергетическом воздействии [5]. Косвенным подтверждением этого предположения может служить скопление «вспученостей» вблизи дефектов поверхности.

Радиационная модификация поверхности наблюдалась также на обратной (неимплантированной) стороне пленки. Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены с учетом следующих обстоятельств. В полимерах возможны различные механизмы передачи энергии: в виде упругих волн (колебаний атомов) или

посредством передачи энергии возбуждения молекул по электронной подсистеме. При этом наличие длинных цепей и периодичность структуры полимеров способствует передаче энергии из области проецированного пробега ионов на сравнительно большие расстояния.

Прямое воздействие ионов на полимер, а также нейтрализация разноименно заряженных ионов и рекомбинация свободных радикалов в треке иона приводят к образованию молекул в возбужденном состоянии. Перенос энергии возбуждения возможен на значительные расстояния вглубь полимера. Оценки показывают, что средний «пробег» электронного возбуждения по алифатической цепочке составляет более 100 связей С–С [4]. Однако, данные расстояния существенно меньше, чем толщина исследовавшихся пленок (40-50 мкм). Поэтому корректно объяснить радиационно-стимулированные процессы на обратной стороне пленки передачей энергии возбуждения электронной подсистемы молекул не представляется возможным. Вероятнее всего, энергия из области пробега ионов на обратную сторону пленки передается с помощью упругих волн, которые могут распространяться по цепочке молекулы либо по границам раздела фаз.

1. Волков В.В., Мчедlishvili Б.М., Ролдугин В.И., Иванчев С.С., Ярославцев А.Б. Мембраны и нанотехнологии // Росс. нано-технологии. – 2008. – Т.3, № 11–12. – С.67–99.
2. Кириш Ю.Э., Тимашев С.Ф. Полимерные мембраны как химические гетерогенные каналы наноструктуры // Крит. техно-логии. Мембраны – 1999 – № 1 – С.15–46.
3. Митрофанов А.В., Апель П.Ю., Блонская И.В., Орелович О.Л. Дифракционные фильтры на основе полиимидных и поли-этиленнафталатных трековых мембран // Журнал технической физики. – 2006. – Т.76, № 9. – С.121–127.
4. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. – М.: Мир, 1988. – 246 с.
5. Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Лукашевич М.Г., Просолович В.С., Оджаяев В.Б. Исследование поверхности полимеров модифицированной радиационной обработкой // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. – 2013. – № 12. – С.83–90.
6. Митрофанов А.В., Карбань О.В., Сугоняко А., Любомска М. Исследование поверхности пленок из полиэтилентерефталата, модифицированных вакуумно-ультрафиолетовым облучением на воздухе // Поверхность. – 2009. – № 7. – С.30–38.

**АНАЛИЗ И ДОРАБОТКА ПРОЕКТА СТБ/ОР  
«ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ТИПА «ТУМБЛЕР». ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ»**

Зайка В. С.<sup>1</sup>, Волкенштейн С. С.<sup>1</sup>, Хмыль А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Планар-СО»,

<sup>2</sup>УО БГУИР, Минск, Республика Беларусь

Во время работы над отзывом и предложениями [1-4] к окончательной редакции, сводке отзывов и пояснительной записке вновь разрабатываемого проекта государственного стандарта СТБ/ОР «Переключатели типа "Тумблер". Общие технические условия» появилась возможность поновому взглянуть на проблему и критически оценить ряд предшественников данного проекта.

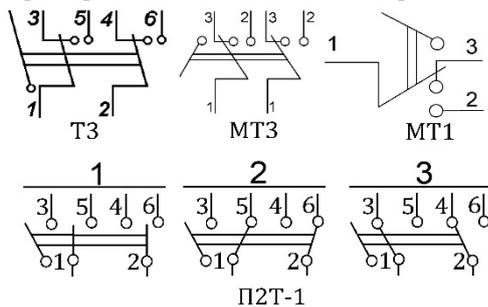


Рисунок 1 – Схемы электрические исследуемых переключателей

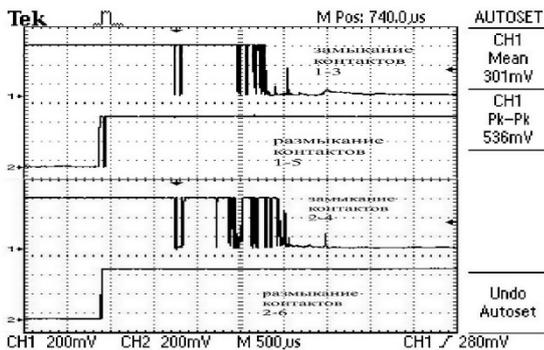


Рисунок 2 – Осциллограмма замыкания/размыкания группы контактов тумблера ТЗ

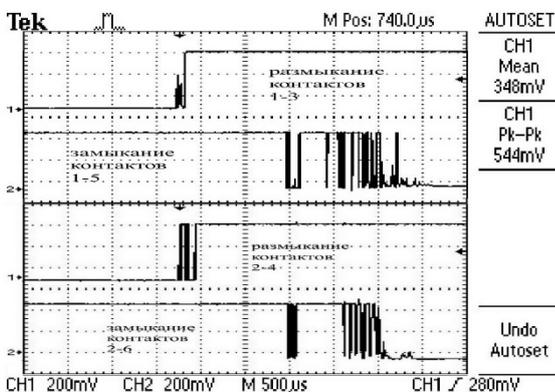


Рисунок 3 – Осциллограмма размыкания/замыкания группы контактов тумблера ТЗ

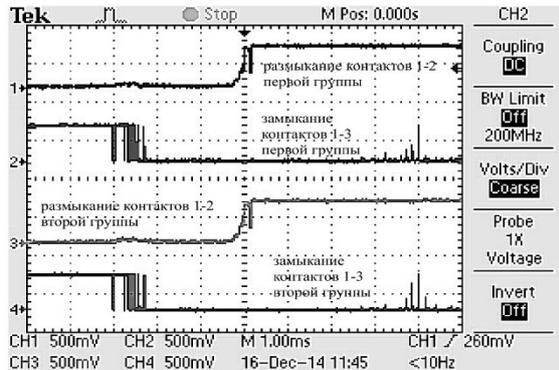


Рисунок 4 – Осциллограмма переключения группы задублированных контактов тумблера МТЗ

Вновь разрабатываемый Проект СТБ/ОР не должен замыкаться на требованиях и методах контроля, которые были разработаны почти полвека назад. Современные требования к переключателям типа «тумблер», имеющиеся в настоящее время аппаратные средства контроля характеристик промышленных изделий массового производства и требования обеспечения качества изделий при высокой степени автоматизации их производства налагают серьезные требования к документам, определяющим и взаимоувязывающим интересы потребителя и поставщика изделий. Учёт этих положений позволит разрабатываемому СТБ/ОР занять достойное место в ряду интеллектуальной продукции.

Для потребителя при выборе применяемых в оборудовании переключателей типа "тумблер" является очень важным знание таких гарантируемых характеристик, каковыми являются продолжительность замыкания контакт-деталей при замыкании контактов переключателя (см. 83 ГОСТ 17703-72) и продолжительность размыкания контакт-деталей при размыкании контактов переключателя (см. 84 ГОСТ 17703-72).

ГОСТ 28811-90 (таблица "Программа испытаний на соответствие тумблеров требованиям ТУ", испытания по "Группе 0А") устанавливает проведение испытаний на соответствие требованию "отскакивание контактов" переключателей типа "тумблер" со ссылкой на пункт 4.3.7 ГОСТ 28627-90 «Дребезг контактов», в котором в качестве негативных последствий указывается: «Электронные логические схемы могут дать ложные сигналы из-за дребезга контактов переключателя».

Упомянутое в процитированном тексте негативное влияние эффектов при замыкании и размыкании контакт-деталей переключателя является не самым негативным последствием этих процессов. Наихудшее действие на работу оборудования, в котором применены переключатели типа "тумблер", производит выделение большой мощности рассеивания на контакт-деталях переключателя из-за увеличения переходного сопротивления контакта переключателя, а также из-за продолжительности замыкания и продолжительности размыкания контакт-деталей, что в итоге приводит к разрушению (эрозии) рабочей поверхности контакт-деталей, изменению эффективной площади контактирования.

В период времени при замыкании (или размыкании) контакт-деталей дребезг может не происходить, но может иметь место существенное (в несколько раз) изменение переходного сопротивления контакта электрической цепи без её разрыва, но со значительным увеличением падения напряжения на контактном переходе (динамическое сопротивление контакта).

Ещё одной характеристикой переключателя, связанной с продолжительностью замыкания и продолжительностью размыкания контакт-деталей является соответствие этих процессов требованию, которое определено термином *"неперекрывающий контакт электрической цепи"* (33 ГОСТ 14312-79). Причём это требование должно обеспечиваться при дублировании контактов переключателя. Если это требование не гарантируется изготовителем, то дублирование контактов переключателя недопустимо, так как может привести к короткому замыканию переключаемых цепей:

- при переключении нагрузки на разные источники электропитания произойдёт короткое замыкание источников электропитания друг на друга;
- при переключении источника электропитания на разные нагрузки произойдёт одновременное подключение нагрузок к источнику электропитания.

Переключатели, на которые не гарантируется требование *"неперекрывающий контакт электрической цепи"* при дублировании контактов переключателя, могут применяться только для замыкания и размыкания электрической цепи, но их применение для переключения электрических цепей недопустимо. Это уточнение обязательно необходимо ввести в пункт 11.6.1 Проекта СТБ/ОР, а в требования к переключателям, которые гарантируют их использование для переключения электрических цепей с дублированием контактов, ввести проверку соответствия этой функциональной характеристике.

В связи с вышеизложенным было проведено изучение и последующий анализ процессов,

происходящих при замыкании/размыкании и переключении электрических цепей контакт-детальными переключателями типа "тумблер" ТЗ [5], МТЗ [6], МТ1 [6], трёхпозиционного П2Т-1 [7]. Микротумблеры типа МТ изготовлены на базе микропереключателя МПЗ-1 [8].

На рис. 1 приведены электрические схемы исследуемых переключателей.

На рис. 2, 3 приведены осциллограммы напряжений в электрических цепях замыкания/размыкания и размыкания/замыкания группы контакт-деталей тумблера ТЗ. В обоих случаях продолжительность замыкания и размыкания составляет  $\leq 2,5$  мс и в данном случае имеет место неперекрывающий контакт электрической цепи.

На рис.4 приведена осциллограмма напряжений в электрических цепях переключения группы задублированных контакт-деталей тумблера МТЗ. Продолжительность замыкания и размыкания составляет  $\leq 3$  мс, и в данном случае имеет место перекрывающий контакт электрической цепи. При переключении электрических цепей задублированных контактов тумблера МТЗ все контакты закорочены в течение времени  $> 2$  мс.

Анализ представленного к рассмотрению разрабатываемого Проекта СТБ/ОР и выявленные его несовершенства предполагают серьёзную доработку в части:

- приведения в соответствие применяемых терминов предмету и цели разрабатываемого Проекта СТБ/ОР;
- дополнения контролируемых характеристик переключателей типа «тумблер», обусловленных практическими требованиями к их применению;
- разработки методов контроля параметров переключателей типа «тумблер», отвечающих возможностям современного состояния технических средств контроля и обеспечения автоматизации процессов контроля.

1. СТБ 1500-2004 «Техническое нормирование и стандартизация. Термины и определения. Технические нормативные правовые акты».
2. ТКП 1.2-2004 «Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки государственных стандартов».
3. ГОСТ 27383-87 «Переключатели типа "Тумблер". Общие технические условия».
4. ГОСТ 28627-90 «Электромеханические переключатели, используемые в электронной аппаратуре. Общие технические условия».
5. АГО.360.407 ТУ.
6. АГО.360.207 ТУ.
7. АГО.360.406 ТУ.
8. МРТУ 11 ОЮ0.360.007ТУ.

УДК 621.317.4

**ПРИСТАВКА К ЯМР ТЕСЛАМЕТРУ Ш1-1 НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ ВЫВОДА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В ЕДИНИЦАХ ТЕСЛА**Пиунов В.Д.<sup>1</sup>, Пряхин А.Е.<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Определение ряда физических параметров может быть прямо или косвенно связано с измерением частоты электрического сигнала. В то же время возможность высокоточного измерения частоты сигнала обуславливает её применение для точного измерения и исследования связанных с частотой параметров и процессов.

Ниже, на примере измерения индукции постоянного магнитного поля методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) тесламетром Ш1-1 показывается возможность использования разработанного нами пересчетного устройства частоты для непосредственного наблюдения на табло интересующего нас параметра – магнитной индукции постоянного магнитного поля. Так, измерение индукции постоянного магнитного поля методом ЯМР с помощью тесламетра Ш1-1 в конечном счете сводится к измерению частоты прецессии атомных ядер рабочего вещества измерительного преобразователя прибора, помещённых в исследуемое магнитное поле при резонансном поглощении энергии высокочастотного магнитного поля. При регистрации сигнала поглощения ЯМР измеряется и на выход тесламетра Ш1-1 подаётся не индукция  $B$ , а частота  $f$  электромагнитных колебаний, которая соответствует условиям резонанса. Для её измерения используется отдельный частотомер. Индукция измеряемого магнитного поля  $B$  в этом случае связана с измеряемой частотой  $f$  ядерного магнитного резонанса соотношением:

$$B = Cf, \quad (1)$$

где  $C = 2\pi/\gamma$  – постоянная, связанная с гиромагнитным отношением  $\gamma$  для ядра атомов рабочего вещества. Для протона  $\gamma_p$  является фундаментальной физической константой. Расчетные коэффициенты  $\gamma/2\pi = 1/C$  для наиболее часто используемых ядер водорода, дейтерия и лития, равны соответственно - 0,0234874, 0,153006 и 0,060435 Тл/МГц и приведены в инструкции по эксплуатации на ЯМР тесламетр Ш1-1. Их путём умножения в соответствии с выражением (1) необходимо использовать, измерив частоту  $f$  для конечного получения величины индукция искомого магнитного поля  $B$ . Операции умножения при их многочисленности, даже с помощью калькулятора, занимают много времени и чреваты появлением ошибок. Кроме того, значения этих коэффициентов  $\gamma/2\pi$  время от времени уточняются.

Для повышения оперативности измерений целесообразно применение специализированного пересчетного устройства. В отдельных средствах измерений это вместе с частотомером реализовано внутри прибора, как в серийно выпускаемом ЯМР тесламетре типа Ш1-9.

В других случаях, как с тем же Ш1-1, когда используется отдельный частотомер, такое простое и эффективное устройство может быть выполнено в виде частотомера, у которого время измерения частоты кратно коэффициенту  $\gamma/2\pi$ .

Задача может быть значительно упрощена, если использовать серийный электронно-счетный частотомер, в котором есть режим измерения отношения частот, подаваемых на два входа, например, вход 1 и вход 2. Необходимо только изготовить счетчик-делитель частоты (пересчетное устройство), коэффициент пересчета (модуль счета) которого устанавливается в виде целого числа, пропорционального коэффициенту  $\gamma/2\pi = 1/C$  (234874, 153006 или 604350 для используемых в преобразователях Ш1-1 элементов). На вход пересчетного устройства подается напряжение с частотой 10 МГц, имеющееся на выходе практически любого серийного частотомера (на задней стенке прибора). Выходной сигнал  $f_2$  пересчетного устройства с частотой  $C \cdot 10^7$  подаётся на вход 2 частотомера, а на его вход 1 подаётся напряжение частоты  $f_1$  с выхода ЯМР тесламетра (Рис.1). Тогда показания частотомера  $F$  с учётом выражения (1) будут

$$F = B/C : 10^7 / C = 10^7 \cdot B, \quad (2)$$

что с точностью до положения десятичной запятой совпадает со значением индукции  $B$  измеряемого магнитного поля, выраженной в мТл.

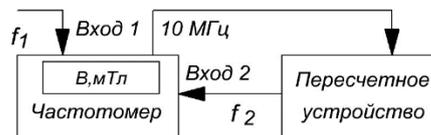


Рисунок 1 – Соединение устройств

При использовании в качестве рабочего вещества различных вышеуказанных ядер пересчетный коэффициент необходимо изменять. Поэтому следует предусмотреть возможность коррекции каждого из коэффициентов  $\gamma/2\pi$ , если

значение гиромангнитного отношения соответствующего ядра будет в очередной раз уточнено (такая коррекция в тесламетре Ш1-9 не предусмотрена).

Структурная схема счетчика-делителя частоты с произвольно устанавливаемым коэффициентом деления (пересчетного устройства) изображена на Рис. 2. Шести или семиразрядный двоично-десятичный суммирующий счетчик (желательно синхронный, для уменьшения времени установления) может быть собран, например, на микросхемах ТТЛ серии 1533. Выходы

1,2,4,8 каждого десятичного разряда подключаются к соответствующим входам

программного переключателя типа ПП8-1(А), ПП8-5(А), или подобным, через диоды, как показано на Рис. 2. Выходы переключателей объединяются и через резистор 1 кОм подключаются к напряжению питания микросхем +5В. Эти переключатели выполняют функцию дешифратора, на котором устанавливается необходимый коэффициент деления счетчика. Когда количество импульсов, поданных на вход счетчика, достигнет установленного на переключателях числа, на выходе дешифратора появится высокий логический уровень, и выходным импульсом с одновибратора счетчик принудительно сбрасывается в начальное нулевое состояние, после чего процесс повторяется.

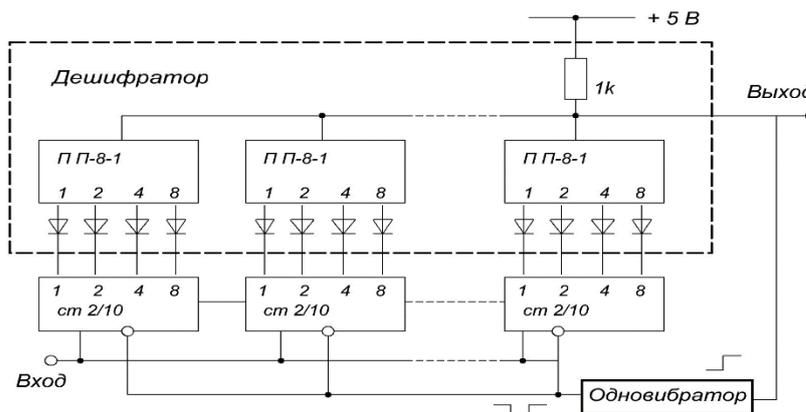


Рисунок 2 – Структурная схема счётчика пересчетного устройства



Рис. 3. Внешний вид приставки

Таким образом, возможна ручная установка (и визуальный контроль) произвольного коэффициента деления. Внешний вид приставки (пересчетного устройства) показан на Рис. 3.

Изготовление и использование пересчетного устройства целесообразно при необходимости частых и многочисленных измерений. Подобное специализированное устройство успешно работает в составе Национального эталона единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля Тесла в диапазоне (0,05 ÷ 2) Тл для выполнения функций Государственной метрологической службы.

УДК 531.717

### К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ ПОГРЕШНОСТИ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Иванов В.В.<sup>1</sup>, Яковишин А.С.<sup>1</sup>, Захаров О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина  
Саратов, Российская Федерация

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
Самара, Российская Федерация

В настоящее время координатно-измерительные машины (КИМ) широко применяются в промышленности, в первую очередь на предприятиях авиационно-космической отрасли и оборонно-промышленного комплекса. С их

помощью решаются разнообразные задачи контроля размеров, формы и расположения как простых, так и сложных поверхностей деталей в лабораторных или цеховых условиях.

Погрешность координатного измерения зависит от исходной погрешности КИМ, указанной в спецификации, точности калибровки датчика касания, условий проведения измерений, состояния КИМ в процессе эксплуатации, а также алгоритмов обработки результатов контроля [1, 2]. При этом некоторые погрешности можно отнести к детерминированным, другие же к статистическим. Например, погрешность срабатывания датчика касания считается случайной, а погрешность виртуального базирования (совмещения систем координат детали и КИМ) будет систематической.

Наиболее полной комплексной оценкой КИМ следует назвать объемную погрешность, представляющую собой совокупность геометрической разности между номинальным и действительным положением измерительного щупа во всем рабочем пространстве КИМ. Следует выделить два подхода к оценке объемной погрешности КИМ: калибровка и оценка эффективности (производительности). При калибровке измеряются составляющие погрешности, вносимые отдельными узлами КИМ. Для отдельных узлов могут быть использованы данные из спецификации СММА (Ассоциация производителей координатно-измерительных машин). К ним относят: погрешность измерения линейных координатных перемещений; отклонение от прямолинейности координатных перемещений; отклонение от взаимной перпендикулярности координатных перемещений; угловые колебания подвижных узлов координатных перемещений; погрешности измерительной головки. Также спецификация описывает окончательные меры для установления общей погрешности измерений. Объемную погрешность можно рассчитать, суммируя геометрически составляющие погрешности, например, по методикам [3-5]. Данная методика для получения надежных статистических данных является трудоемкой и дорогостоящей, так как требует применения лазерных интерферометров. Поэтому она преимущественно применяется производителями КИМ. Результаты калибровки используют для составления карты погрешностей и их программной компенсации, а также анализа погрешностей узлов и элементов КИМ для дальнейшего исправления или совершенствования.

Для оценки эффективности КИМ используют различные эталоны (наборы концевых мер, сфера, плита со сферами и некоторые другие [3, 4]). Процедура оценки определена международным стандартом EN ISO 10360. Максимально допустимая погрешность (MPE) при измерении длины, согласно EN ISO 10360-2

$$E_{MPE} = A + L / K \leq B \quad ,$$

где  $A$  – константа, установленная производителем, мкм;  $K$  – безразмерная константа, установленная производителем;

$L$  – измеренная длина, мм;  $B$  – верхняя предельная величина погрешности, мкм.

Рекомендации по оценке эффективности КИМ основаны на выборке измерения длины измерительного прибора для определения того, соответствует ли его точность заявленной максимальной допустимой ошибке измерения изготовителя. Тесты позволяют сделать только заявления об общей возможности измерения длины. Это ограничение связано со сложным способом суммирования ошибок в КИМ. Поэтому неопределенность измерения выборочной длины не может считаться репрезентативной для всех возможных задач измерения, которые КИМ способна выполнять.

Оба метода не исключают один другого, а дополняют. При производстве КИМ проверяют обоими методами. В период эксплуатации поэлементным методом КИМ проверяется обычно один раз в год, а для выявления причин потери точности проводится комплексная проверка с периодичностью в месяц.

Таким образом, построение карты объемной погрешности КИМ дает наиболее полную картину (рис. 1). Вместе с тем интерпретация полученных результатов является мало освещенной в известной литературе задачей. Основной подход заключается в компенсации систематической погрешности. На практике встречаются и другие задачи, например, сравнение эффективности двух КИМ при условии, что максимальная погрешность у обеих находится в допустимых пределах.

Для возможности оценки объемной погрешности КИМ предлагается следующий статистический критерий:

$$K = k_1 \frac{n_1}{n} + k_2 \frac{n_2}{n} \quad ,$$

где  $n$  – общее число точек измеренного пространства;  $n_1$  – число точек с погрешностью, превышающей  $3\sigma$ ;  $n_2$  – число точек с погрешностью, превышающей  $2\sigma$ ;  $k_1, k_2$  – весовые коэффициенты.

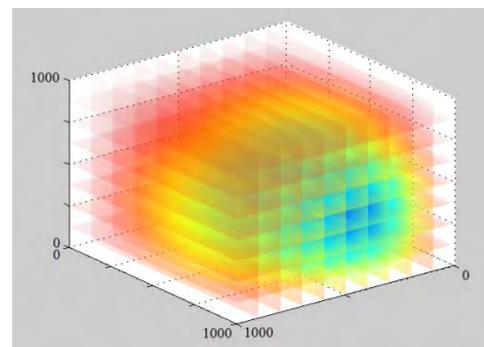


Рисунок 1 – Пример объемной погрешности КИМ

Данный критерий показывает, сколько точек рабочего пространства КИМ имеют погрешности, значительно отличающихся от среднего значения

в выборке. Чем больше значение критерия, тем ниже эффективность КИМ при условии, что все погрешности не превышают установленную производителем максимальную погрешность. Наличие точек с погрешностью, превышающей  $3\sigma$ , свидетельствует о наличии погрешностей изготовления или сборки узлов КИМ, компенсировать которые систематической составляющей будет затруднительно. Пример иллюстрации погрешности вдоль координатной оси дан на рис. 2.

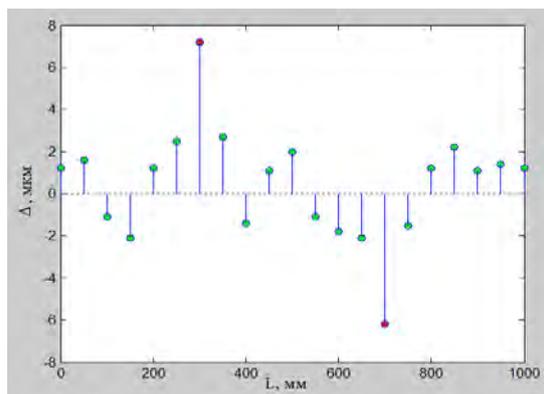


Рисунок 2 – Пример погрешности КИМ по координатной оси

Назначение весовых коэффициентов проводится в зависимости от габаритных размеров КИМ, решаемых измерительных задач и условий измерения. Целесообразно выбирать  $k_2 = (5-10)k_1$ . Критерий может быть использован для сравнения эффективности двух КИМ при прочих равных условиях.

Таким образом, научно обоснован статистический критерий для оценки объемной погрешности КИМ, представляющий собой взвешенную сумму отношения числа точек, в которых погрешность превышает соответственно  $3\sigma$  и  $2\sigma$ , к общему числу контрольных точек рабочего пространства КИМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10204).

1. Кононов С.А. Концепция обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы / С.А. Кононов, В.Г. Лысенко, С.Ю. Золотаревский // Приборы. – 2008. – № 3. – С. 1–13.
2. Набока Е.В. Анализ погрешностей измерений на координатно-измерительных машинах / Е.В. Набока, В.В. Лысюк // Вестник НТУ «ХПИ» Технології в машинобудуванні: сборник научных трудов. – 2010. – С. 84–88.
3. Суслин В.П. Методика объемной компенсации систематических погрешностей координатно-измерительных машин на основании измерения плиты со сферами / В.П. Суслин, А.В. Джунковский // Исследовано в России. – 2006. – С. 2211–2218.
4. Серков Н.А. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка / Н.А. Серков // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2011. – № 3. – С. 68–78.
5. Телешевский В.И. Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением / В.И. Телешевский, В.А. Соколов // Измерительная техника. – 2012. – № 5. С. 33–37.

УДК 621.316.722.1(045)(476)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Валенда А.Г., Волкодатов А.А., Прусаков А.К., Ярмолович М.А.

Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

### Введение

В настоящее время высоковольтные технологии имеют самый широкий спектр применения. Огромное количество энергии передаются в Республике Беларусь по государственным перетокам напряжением 110, 220, 330 и 750 кВ и высоковольтным линиям электропередачи. Также высокие напряжения используются в медицине, транспорте, промышленности, при проведении научных исследований.

### Особенности высоковольтных измерений

Особенностью высоковольтных измерений является использование выносных масштабных преобразователей для понижения измеряемого напряжения до величин, удобных и более безопасных для измерений.

Таким образом, существует отдельный класс средств измерений – масштабные преобразователи высокого напряжения переменного и постоянного тока в напряжение величиной не более 1000 В. К таким масштабным преобразователям относятся электромагнитные и емкостные трансформаторы напряжения, резистивные и резистивно-емкостные делители напряжения.

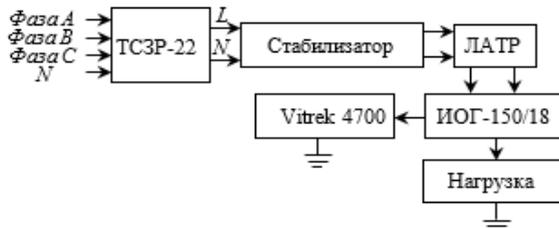
Для осуществления метрологического контроля киловольтметров и высоковольтных масштабных преобразователей служит созданная в БелГИМ высоковольтная лаборатория

### Состав высоковольтного источника

Основной составной частью высоковольтной лаборатории является регулируемый высоковольтный источник напряжения переменного тока до 150 кВ, включающий в себя

повышающий трансформатор ИОГ-150/18, регулирующий автотрансформатор TDGC2-10, стабилизатор напряжения переменного тока RUHSTRAT JK 13 и сетевой трансформатор - преобразователь трехфазного питающего напряжения в однофазное ТСЗР-22 380-415/S\*/216-223-230-237-244. В качестве эталонов используются киловольтметр Vitrek 4700 с делителями HVL-150, HVL-100, HVL-35 и киловольтметр KVM-100.

Структурная схема высоковольтного источника представлена ниже.



Для контроля условий выполнения измерений используются термогигрометр ИВА-6Б2 и устройство контроля параметров электрической сети УК1.

#### Необходимость стабилизатора

Стабилизатор напряжения является необходимой и достаточно важной составной частью регулируемого высоковольтного источника.

Многие высоковольтные лаборатории сталкиваются с проблемой флуктуации выходного напряжения высоковольтного источника вследствие изменения входного напряжения электропитания или изменения нагрузки. Данное явление оказывает негативный эффект на качество измерений и усложняет оценку результатов измерений.

Правильно выбранный стабилизатор напряжения позволяет исключить одну из составляющих неопределенности измерений и повысить точность измерений.

#### Описание методов стабилизации

Существуют четыре основных типа стабилизаторов напряжения: релейные, симисторные, сервоприводные (электромеханические), феррорезонансные. Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки. Рассмотрим каждый из них.

Принцип действия релейных стабилизаторов напряжения основан на ступенчатом регулировании напряжения путем подключения силовых реле к определенным отводам трансформатора. Чем больше отводов имеет обмотка, тем точнее может быть регулирование. К достоинствам можно отнести высокую скорость регулирования, но как следствие переключений, искажается форма синусоиды. Из-за конструктивных ограничений по количеству отводов невозможно добиться

высокой точности стабилизации в широком диапазоне входных напряжений.

Симисторные стабилизаторы напряжения осуществляют регулировку по релейному типу, но вместо реле применяются электронные ключи. Как результат имеем более высокую, чем в релейных стабилизаторах надежность и высокую скорость регулировки, но остается невысокая точность стабилизации.

Сервоприводные стабилизаторы напряжения представляют автотрансформатор с автоматическим управлением. При отклонении входного напряжения электродвигатель по команде управляющей электроники перемещает контакты в необходимое положение на обмотке. Этот способ позволяет производить плавную регулировку, что повышает точность регулирования и не искажает синусоиду выходного напряжения, но из-за применения сервоприводов имеем низкое быстродействие и низкую надежность по сравнению с другими методами.

Феррорезонансные стабилизаторы напряжения основаны на свойствах системы, включающей насыщенный и ненасыщенный дроссели и конденсатор. Вольтамперная характеристика такой системы содержит пологий участок, используемый для стабилизации напряжения. Основными достоинствами являются высокая скорость и точность стабилизации. Такие стабилизаторы не боятся короткого замыкания на выходе, допускают, для повышения мощности на нагрузке, параллельную работу нескольких стабилизаторов. Отсутствие движущихся элементов позволяет достичь высокой надежности и большого ресурса работы. К недостаткам можно отнести отсутствие возможности регулирования выходного напряжения, искажения синусоидальности и большой вес. Также применение такого типа стабилизаторов ограничено в сетях с емкостной нагрузкой.

#### Требования к стабилизатору напряжения

Технические требования к стабилизатору напряжения при поверке измерительных трансформаторов напряжения вытекают из требований к высоковольтному источнику напряжения, установленных ГОСТ 8.216-2011. Допускаемые колебания напряжения от установленного значения не должны превышать  $\pm 3\%$  в течение 5 мин, коэффициент гармоник не более 5%.

При поверке высоковольтных делителей напряжения и киловольтметров требования к точности поддержания напряжения стабилизации и, соответственно, выходного напряжения высоковольтного источника при напряжениях 100 кВ и выше можно определить исходя из типового предела погрешности  $\pm 1\%$  поверяемых киловольтметров или делителей напряжения и погрешности применяемого эталонного киловольтметра Vitrek 4700  $\pm 0,12\%$ . При минималь-

ном запасе точности  $\pm 0,33\%$  с учетом погрешности эталонного оборудования нестабильность напряжения должна составлять не более  $\pm 0,3\%$ .

Таким образом, стабилизатор напряжения, используемый в регулируемом высоковольтном источнике, должен обладать следующими характеристиками: колебания выходного напряжения не более  $\pm 0,33\%$  в течение времени измерения, коэффициент гармоник не более  $5\%$ .

Анализ существующих типов стабилизаторов показывает, что стабилизатор феррорезонансного типа в наибольшей мере отвечает требованиям по скорости и точности стабилизации, по вносимому коэффициенту гармоник и уровню надежности. По результатам маркетинговых исследований выбрана модель феррорезонансного стабилизатора, наиболее полно отвечающая приведенным выше требованиям и произведена закупка стабилизатора JK13 немецкой компании RHNSTRAT.

#### Исследование характеристик

С целью определения реальных технических характеристик приобретенного стабилизатора напряжения JK13 и его возможностей в составе высоковольтного источника напряжения проведено исследование его основных функциональных зависимостей:

- зависимости напряжения стабилизации от изменения входного напряжения  $\pm 10\%$  при постоянной нагрузке;
- временной стабильности выходного напряжения при неизменных входном напряжении и сопротивлении нагрузки;
- зависимости коэффициента гармоник от входного напряжения на стабилизаторе;
- спектральной диаграммы выходного напряжения;

- зависимости напряжения стабилизации от силы тока нагрузки при понижении входного напряжения от  $-10\%$  до  $-20\%$ ;

- зависимости напряжения стабилизации от силы тока нагрузки.

#### Заключение

По результатам проведенных исследований установлено, что стабилизатор модели JK13 немецкой компании RHNSTRAT отвечает всем требованиям к работе в составе источника высокого напряжения высоковольтной лаборатории БелГИМ и может использоваться для повышения стабильности выходного напряжения высоковольтного источника при колебаниях напряжения питающей сети. Наилучшая стабильность и минимальный коэффициент гармоник для данной модели стабилизатора обеспечиваются при нагрузках от  $0,95$  до  $1,15 P_{ном}$  и пониженном входном напряжении от минус  $10\%$  до минус  $20\%$  от  $U_{ном}$ . В случаях, когда снижение входного напряжения для минимизации гармонических искажений невозможно, в составе лаборатории могут применяться силовыенизкочастотные фильтры, разработка компонентов которых производится в настоящее время совместно с ОАО «МЭТЗ им. В.И. Козлова».

Для стабилизации напряжения высоковольтного источника при нагрузках до  $12$  или  $18$  кВт можно рекомендовать включение в параллельную работу двух или трех аналогичных стабилизаторов на одну нагрузку.

1. Стабилизатор напряжения модели JK13: брошюра производителя.
2. Стабилизаторы напряжения сети Б2-2. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. Паспорт. ЕЭЗ.238.006 ТО.

УДК 533.6.089.68(047)(476)

## СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭТАЛОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ

**Манкевич О.Д., Ровнейко И.В.**

*Белорусский государственный институт метрологии*

*Минск, Республика Беларусь*

В докладе рассмотрены основные типы и принципы действия средств измерений скорости воздушного потока, а также эталонная база для проведения метрологического контроля этих средств измерений в Республике Беларусь. Описан состав и принцип действия аэродинамической установки, имеющейся в БелГИМ, приведены ее метрологические характеристики. Указаны перспективы развития эталонной базы Республики Беларусь в области измерения скорости воздушного потока.

Измерение скорости воздушного потока широко используется в следующих сферах деятельности:

- для санитарного, экологического и технического надзора в жилых и производственных помещениях,
- при мониторинге окружающей среды, контроле выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и контроле качества атмосферного воздуха,
- в системах кондиционирования, отопления и вентиляции,
- в шахтах и рудниках всех категорий на предприятиях химической, горно-рудной промышленности,
- для обеспечения безопасной работы на подъемниках, вышках, грузоподъемных кранах и

других объектах, оборудованных устройствами аварийной ветровой защиты,

- для аттестации рабочих мест,
- при проведении аэродинамических испытаний,
- для метеорологических измерений,
- в авиации, военно-воздушных силах, в аэропортах.

Для измерения скорости воздушного потока применяются такие средства измерений, как анемометры (от греческого «анемос» – ветер и «метрео» – измеряю) и напорные трубки (Пито и НИИОГАЗ). На территории Республики Беларусь эксплуатируются анемометры чашечного типа, крыльчатые, ультразвуковые и термоанемометры. Принцип действия чашечных анемометров основан на преобразовании вращения крыльчатки чашечного типа под действием воздушного потока в электрический сигнал, представляющий собой последовательность электрических импульсов с частотой, пропорциональной скорости вращения крыльчатки. Основная область применения анемометров чашечного типа – обеспечение безопасной работы на грузоподъемных кранах и объектах, требующих оборудования устройствами аварийной ветровой защиты. При этом некоторые модели этого типа имеют аварийную звуковую или световую сигнализацию при достижении предельного значения скорости или длительности порыва ветра.

Главное отличие крыльчатого анемометра от чашечного состоит в том, что чувствительный элемент, на который воздействует скорость воздушного потока, выполнена в форме вентилятора. Поток воздуха, попадая на вентилятор, вращает лопасти и по скорости их вращения измеряется скорость потока. Основная область применения крыльчатых анемометров – системы отопления и кондиционирования, строительство, метеорология, аэродинамика, авиация, а также измерения скорости воздушного потока в шахтах.

Принцип действия термоанемометров заключается в нагревании выше температуры измеряемой среды и последующем охлаждении воздушным потоком открытой тонкой нити накаливания. Сопротивление нити изменяется при изменении температуры и определенным образом зависит от скорости потока. Термоанемометры используются для измерения скорости воздушного потока в жилых и производственных помещениях, системах кондиционирования, отопления, вентиляции, для экологического и технологического контроля производств и многих других сферах деятельности.

Принцип действия ультразвуковых анемометров основан на приеме ультразвуковых волн, распространяющихся в воздуховоде между двумя пьезоэлектрическими преобразователями. Эти преобразователи поочередно становятся то

излучателем, то приемником. Осуществляется измерение разности времени прохождения ультразвуковых волн по потоку и против него и вычисление скорости звука. Ультразвуковые анемометры используются для интеграции в системы автоматики, при измерениях в вентиляционных системах и в метеорологии.

Трубки напорные модификация Пито и НИИОГАЗ являются приемниками полного и статического давления. Трубка напорная модификации НИИОГАЗ конструктивно представляет собой спаянные между собой по длине две стальные трубки. Трубка для приема полного давления изогнута навстречу потоку и заканчивается коническим наконечником. Отверстие во второй трубке воспринимает статическое давление. Трубки напорные предназначены для измерения скорости воздушного потока в комплекте с дифференциальными манометрами или микроманометрами и используются в газоходах, вентиляционных системах и авиации.

Учитывая тот факт, что вышеперечисленные области применения относятся к сфере законодательной метрологии, средства измерений скорости воздушного потока подлежат обязательному метрологическому контролю. До января 2016 года в Республике Беларусь метрологический контроль анемометров и трубок напорных осуществлялся при помощи двух аэродинамических стендов: АС-0,2/50, принадлежащий СП «Природоохранные и энергосберегающие технологии» и АДС300/45-3, принадлежащий ЧНПУП «ДЭКОС-Плюс». В основе этих двух стендов лежит аэродинамическая труба замкнутого типа. Аэродинамическая труба состоит из воздухопроводов с поворотными патрубками, вентилятора, форкамеры (выходного воздуховода), выпрямителя потока, диффузора, измерительного сопла и щита управления. Принципиальное отличие между стендами состоит в выборе эталонных средств измерений. Так при работе аэродинамического стенда АДС300/45-3 измерение скорости воздушного потока на выходе измерительного сопла осуществляется с помощью эталонного анемометра ЭА-70(0) в диапазоне скоростей от 0,1 до 4 м/с и напорной трубки Пито в комплекте с эталонным микроманометром МКВ-250 при измерении скорости свыше 4 м/с. При работе аэродинамического стенда АС-0,2/50 для измерения скорости в различных диапазонах в качестве сужающих устройств используются 3 конфузора с различными диаметрами измерительного сопла и экспериментально определенными коэффициентами конфузора. При этом эталонным средством измерений является микроманометр МКВ-250, с помощью которого осуществляется измерение перепада давления на

выходе измерительного сопла соответствующего конфузора. Основные метрологические и технические характеристики вышеназванных стендов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование характеристики	АС-0,2/50	АДС300/45-3
Диапазон воспроизведения скорости воздушного потока, м/с	от 0,1 до 50	от 0,1 до 45
Пределы абсолютной погрешности, м/с	$\pm(0,01 + 0,02V)$	$\pm(0,015 + 0,015V)$
Диаметр измерительного сопла, мм	150; 50; 18	300

Характеристики вышеназванных аэродинамических стендов не в полной мере удовлетворяют потребностям промышленных предприятий страны в метрологическом контроле средств измерений скорости воздушного потока в части погрешности воспроизведения скорости воздушного потока и диаметра рабочей части. Поэтому в 2015 году БелГИМ заказал и приобрел комплект аппаратуры для измерения скорости воздушного потока на базе установки аэродинамической замкнутого типа WK845050-G производства фирмы «Westenberg Engineering» (Германия) и лазерного доплеровского анемометра производства фирмы ILA GmbH (Германия). Внешний вид аэродинамической установки WK845050-G и ее структурная схема приведены на рисунке 1.

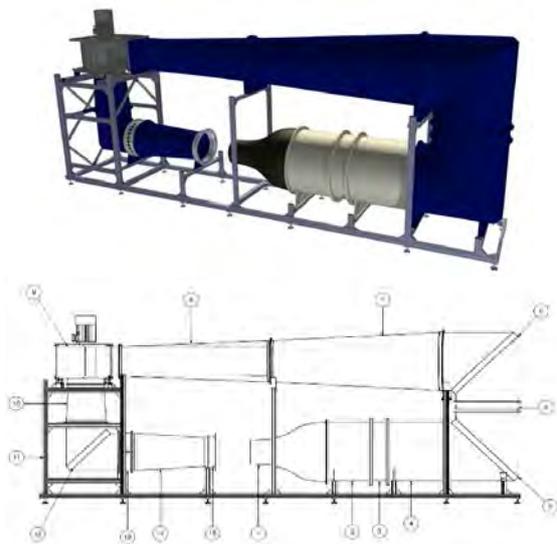


Рисунок 1 – Внешний вид и структурная схема аэродинамической установки WK845050-G

На структурной схеме показаны следующие элементы конструкции аэродинамической установки:

1 – измерительное сопло, служащее для передачи воздуха с заданной скоростью. Измерительное сопло в виде конфузора приводит к ускорению потока воздуха, поступающего из подготовительной камеры. Отношение диаметра

подготовительной камеры и выходного отверстия сопла равно 1:6;

2, 3, 4 – подготовительные камеры стабилизации потока. При этом в камере 4 расположен сотовый струевыпрямитель, который обеспечивает достижение постоянного потока, а также снижает чувствительность установки к внешним влияниям. В подготовительной камере 3 расположен дополнительный струевыпрямитель в виде сита. Он служит для обеспечения однородности линий воздушного потока, а также гашения оставшихся возмущений потока;

5, 12 – аэродинамические углы, обеспечивающие минимизацию трения во время прохождения воздуха. Причем потери давления при использовании аэродинамических углов значительно меньше, чем в конструкциях стендов с применением колен;

6, 7, 8 – воздухопроводы;

9 – вентилятор, служащий для создания потока воздуха;

10, 14 – диффузоры, служащие для замедления скорости потока путем увеличения диаметра трубопровода;

11 – металлическая рампа;

13 – регулятор давления, представляющий собой ряд отверстий, расположенных по диаметру трубопровода;

15 – входное сопло.

Диаметр измерительного сопла установки составляет 450 мм, что позволяет производить метрологический контроль средств измерений скорости воздушного потока с диаметром крыльчатки свыше 250 мм, что до настоящего времени технически не обеспечивалось на существующих в РБ аэродинамических стендах.

Помимо аэродинамической установки в состав комплекта аппаратуры для измерения скорости воздушного потока, приобретенного БелГИМ, входят следующие средства измерений и вспомогательное оборудование:

- трубка ПИТО в комплекте с преобразователями дифференциального давления и системой вычисления и управления потоком;
- термоэлектрический анемометр типа 8455-300-1 с системой вычисления и управления потоком;
- преобразователи абсолютного давления, температуры и влажности измеряемой среды;
- система позиционирования 3-координатная;
- LDA система типа flowPOIN 50f-us с фокусным расстоянием 500 мм и лазерным лучом на объективе 45 мм. Мощность лазера Nd-VAG составляет 75 мВт, длина волны – 532 нм. Зонд LDA размещается на автоматическом 3D слайде с диапазоном перемещений 700 мм по каждой оси;
- аэрозольный генератор AGF;
- компрессор;
- персональный компьютер.

Блок-схема комплекта аппаратуры для измерений скорости воздушного потока приведена на рисунке 2.

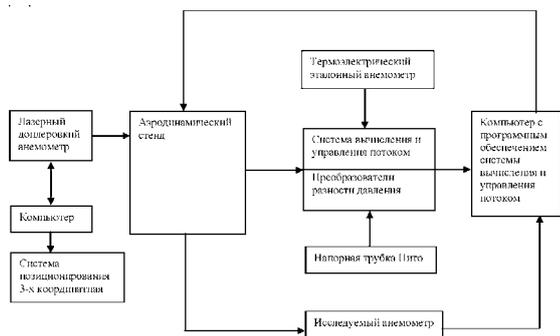


Рисунок 2 – Блок-схема комплекта аппаратуры для измерения скорости воздушного потока

Специалистами БелГИМ была разработана программа и методика метрологической аттестации установки аэродинамической эталонной измерительной WK845050-G и проведена ее метрологическая аттестация. По результатам метрологической аттестации получены следующие значения воспроизведения скорости воздушного потока:

- в диапазоне от 0,1 до 0,5 м/с  $\pm(0,009 + 0,009 \cdot V)$ ;
- в диапазоне от 0,5 до 1,0 м/с  $\pm(0,004 + 0,01 \cdot V)$ ;
- в диапазоне от 1,0 до 40 м/с  $\pm(0,004 + 0,009 \cdot V)$ .

УДК 621.317.732.082(045)(476)

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА ПОВЕРИТЕЛЯ ПРИ ПОВЕРКЕ МНОГОЗНАЧНЫХ МЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сентемова Д. В.

*Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время трудно себе представить какой либо вид деятельности без автоматизации. Необходимость автоматизировать процесс возникает, если этот процесс довольно трудоемок, а его время выполнения становится неудовлетворительным. Автоматизация позволяет упростить сложные операции, связанные с расчетами, а также исключить человеческий фактор.

Автоматизация – также одно из направлений повышения эффективности метрологических работ, призванное обеспечить высокие темпы научно-технического прогресса за счет:

- получения более полных данных об исследуемых средствах измерений;
- сокращения сроков метрологических исследований и снижения затрат на основе уменьшения трудоемкости измерений, ускорения экспериментов, уменьшения ошибок;
- оптимизации измерительного эксперимента, повышения точности измерений, оптимизации работ по ведению учета средств измерений и измерительного оборудования;

Как следует из вышеизложенного, погрешность воспроизведения скорости воздушного потока установкой WK845050-G является наименьшей по сравнению с имеющимися в РБ стендами. Установка аэродинамическая эталонная измерительная WK845050-G введена в эксплуатацию 04.01.2016 г. и в настоящее время на ней выполняются работы по метрологическому контролю средств измерений скорости воздушного потока различных типов и принципов действия (testo, ТКА-ПКМ, ИСП-МГ4, АСП-3, МЭС-200А, ТТМ-2, трубки напорные ПИТО и НИИОГАЗ). В соответствии с заданием 2.8 ГНТП «Эталоны Беларуси» в 2016-2017гг. планируется исследовать метрологические характеристики лазерного доплеровского анемометра, входящего в состав приобретенного комплекта оборудования для измерения скорости воздушного потока и с его помощью провести исследования аэродинамической установки. Это позволит создать Национальный эталон единицы скорости воздушного потока, который позволит достигнуть наивысшей точности в метрологическом обеспечении в данной области измерений.

1. WK 845050-G Wind Tunnel. Manual. V1.00
2. ГОСТ 8.542-86 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений скорости воздушного потока.

- создания базы данных, содержащих сведения о предыдущих результатах исследуемых средств измерений [1].

Предлагаю вам рассмотреть автоматизацию рабочего места поверителя при поверке многозначных мер электрического сопротивления (далее – ММЭС), разработанную на базе поверочной лаборатории БелГИМ.

ММЭС уже долгое время используются в метрологии для поверки и калибровки измерителей электрического сопротивления, омметров и мегомметров, многофункциональных калибраторов и мультиметров, а также поверки и калибровки термопреобразователей сопротивления. Фактически ММЭС представляет собой последовательно соединенный набор отдельных резисторов, которые можно включать или отключать от схемы, регулируя необходимое суммарно воспроизводимое сопротивление. Внешний вид одного из типов многозначных мер электрического сопротивления Р33 представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид многозначной меры электрического сопротивления типа P33

Несмотря на кажущуюся простоту данного средства измерений, возникает немало вопросов при их поверке. Например, всем известная поэлементная поверка, описанная в МИ 1695-87, заставляет каждый раз задумываться поверителей о правильности расчета действительного значения сопротивления ММЭС. Автоматизация же процесса поверки в свою очередь позволит исключить погрешность оператора при расчетах поправок и действительного значения сопротивления.

Для создания любой системы автоматизации необходимо приложить не малые усилия. Усилия не только финансовые, но и сотрудников. Нужно работать в четком взаимодействии с разработчиками, излагать им свои замыслы, пожелания и требования, проверять, то, что они сделали и не останавливаться на полпути. Для начало лучше всего сформулировать цели и задачи автоматизации процесса. И так, были сформулированы следующие задачи автоматизации рабочего места поверителя при поверке ММЭС:

- уменьшение трудоемкости поверки ММЭС;
- обработка и анализ результатов измерений при поверке;
- формирование протоколов поверки и свидетельств о поверке или заключений о непригодности;
- создание базы данных о всех поверяемых ММЭС.

Главная цель автоматизации поверки ММЭС – это автоматизация всего процесса поверки, начиная с внешнего осмотра ММЭС заканчивая выдачей результата поверки.

При проведении поверки ММЭС выполняются такие основные операции поверки как:

- внешний осмотр,
- опробование,
- определение среднего значения начального сопротивления и его вариации,
- определение основной погрешности сопротивлений ММЭС,
- определение нестабильности за год.

Основными составными частями любой автоматизации рабочего места является наличие эталонного программируемого измерительного устройства, персонального компьютера и базы данных.

Автоматизация рабочего места поверителя при поверке ММЭС была основана с использованием метода непосредственной оценки с помощью нановольтметра/микроомметра Agilent 34420A [2]. Упрощенная схема измерения сопротивления при автоматизации рабочего места поверителя приведена на рисунке 2.

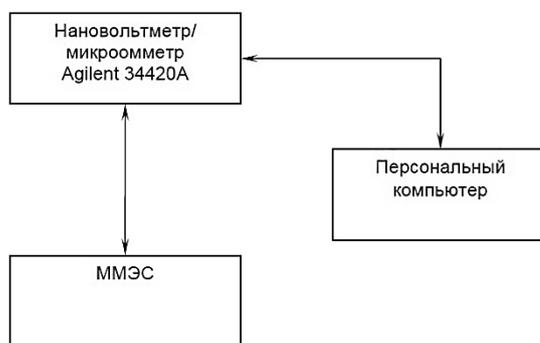


Рисунок 2 – Упрощенная схема измерения сопротивления при автоматизации рабочего места поверителя

При подключении ММЭС к измерителю используется четырехзажимная схема подключения. В программе реализована функция «Проверки связи с прибором», что позволяет на начальном этапе проведения поверки исключить ошибку при подключении ММЭС.

На рисунке 3 изображен пример программного окна в начале проведения поверки.



Рисунок 3 – Пример программного окна

Измерения при поверке данным способом можно разделить на три этапа. На первом этапе нановольтметр/микроомметр Agilent 34420A измеряет четыре значения начального сопротивления ММЭС. Затем программа рассчитывает среднее значение начального сопротивления  $R_{0\text{ср}}$  и вариацию начального сопротивления  $\Delta R_{0\text{ср}}$ . Данные о среднем значении начального сопротивления ММЭС автоматически сохраняются в памяти программы.

Далее на втором этапе определяется основная абсолютная погрешность ММЭС. Нановольтметр/микроомметр Agilent 34420A

измеряет действительное значение каждой ступени декады ММЭС (с учетом начального сопротивления). Затем программа рассчитывает абсолютную погрешность  $i$ -ой ступени  $n$ -ой декады по формуле

$$\Delta_m = R_n - (R_{\text{изм}} - R_0), \text{ Ом} \quad (1)$$

где  $R_n$  – номинальное значение сопротивления  $i$ -ой ступени  $n$ -ой декады;  $R_{\text{изм}}$  – измеренное значение сопротивления;  $R_0$  – начальное значение сопротивления ММЭС измеренное на первом этапе.



Рисунок 4 – Фотография автоматизированного рабочего места поверителя при поверке ММЭС

Нестабильность ММЭС за год определяется на третьем этапе путем сравнения действительных значений сопротивлений, полученных при данной и предыдущей поверках.

Программа позволяет сравнивать полученные результаты абсолютной погрешности ММЭС и нестабильности ММЭС с допускаемыми значениями, хранящимися в базе данных, что

исключает ошибку при анализе полученных результатов.

По окончании всех измерений на основе полученных данных программа позволяет сформировать протокол поверки, свидетельство о поверке или заключение о непригодности.

Фотография автоматизированного рабочего места поверителя при поверке ММЭС представлена на рисунке 4.

Таким образом, в результате автоматизации были выполнены все поставленные выше цель и задачи. Из рассмотренного способа автоматизации рабочего места можно сделать следующие выводы, что автоматизация поверки мер электрического сопротивления обеспечивает:

- простоту и удобство при проведении измерений для поверителя;
- компактность размещения;
- легкость формирования полученных данных в протокол поверки, свидетельство о поверке и заключение непригодности;
- хранение в памяти исходных данных о всех типах поверяемых ММЭС;
- упрощение организации технического обслуживания.

В дальнейшем планируется расширить автоматизацию данного рабочего места поверителя для выполнения поверки мостов и потенциметров постоянного тока.

1. Ревин, В.Т. Автоматизация метрологических работ / Ревин В.Т. – Минск: БГУИР, 2011. – 64 с.
2. Поверка средств измерений электрических величин / Е.А. Казакова [и др]; под ред. В.Л. Гуревич, О.П. Реут. – Минск: БелГИМ, 2017. – 223 с.

УДК 621.317.723.037.372.082(045)(476)

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОВЕРКИ ЦИФРОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ

**В.В. Силч**

*Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь*

Проблема конкурентоспособности фирм, отраслей, стран — одна из наиболее актуальных и динамичных в мировой экономике. Беларусь придает этой области приоритетное значение. Завоевание подобающего места в мировой экономике в современных условиях необходимо для обеспечения устойчивого развития страны, роста благосостояния ее граждан, расширения взаимовыгодного сотрудничества в мире.

Проблема повышения качества продукции в Беларуси на сегодняшний день относится к перечню наиболее актуальных.

Чтобы быть конкурентоспособными, вести успешную экономическую деятельность и повышать уровень удовлетворенности потребителей, предприятиям необходимо использовать резуль-

тативные системы качества. Важнейшим структурным элементом обеспечения качества на предприятии является метрологическая служба – служба, несущая ответственность за метрологическое обеспечение измерений при разработке, изготовлении, испытаниях и эксплуатации продукции и иной деятельности. Профессия метролога связана с выполнением значительного объема рутинных операций по документированию всех действий, производимых над средствами измерений и их автоматизацией на всех этапах жизненного цикла. В связи с этим, в метрологических службах предприятий необходимо осуществлять внедрение современных методов и средств автоматизации, которые позволят уменьшить трудозатраты и увеличить

производительность труда сотрудников предприятий.

Ключевой возможностью улучшения качества услуг лаборатории, увеличения пропускной способности, является автоматизация. Автоматизация процесса поверки дает много преимуществ техническим специалистам: повышается производительность труда, достоверность измерений, а также облегчается процесс документального оформления свидетельств и протоколов по проведенным измерениям. Также облегчается создание отчетов и ведение статистического учета занятости технического персонала. Кроме этого, использование программного обеспечения для управления процессом поверки обеспечивает учет средств измерения, хранение результатов поверки и всех средств измерения когда-либо находящихся в данной метрологической службе, отслеживать средства измерения, у которых истек или истекает межповерочный интервал, а также проводить анализ информации по средствам поверки и в составлении отчетов по этой информации.

Так как в основе деятельности лаборатории лежат процессы поверки, об их автоматизации стоит задумываться в первую очередь. Итак, внедрение автоматизации рабочих мест в современной лаборатории продиктована рядом факторов:

- высокая сложность ряда методик поверок;
- сложность современных СИ;
- большая трудоемкость при поверке;
- увеличивающиеся объемы на предприятиях приводят к перегрузке лабораторий.

Так же процессу автоматизации способствует обновление парка средств измерений, большинство приборов поддерживают управление по интерфейсу.

Некоторые сложности на пути внедрения автоматизации рабочих мест:

- Не все лаборатории обладают современным эталонным оборудованием с интерфейсом управления.
- Широкий перечень поверяемых СИ, поступающих в лабораторию.

Рассмотрим автоматизацию процесса поверки мультиметров на рабочем месте более подробно.

Аппаратно-программный комплекс MultiTess (далее АПК MultiTess) – комплексное решение для полностью автоматизированной поверки мультиметров. АПК MultiTess управляет калибраторами Fluke, Transmille и считывает показания мультиметра с использованием инновационных технологий машинного зрения или с помощью интерфейса (MVS Express Interfaca Edition – ПО «Поверитель по интерфейсу»).

АПК MultiTess разработан специально для рынка СНГ и учитывает все особенности национальных методик поверки мультиметров. Основным критерием при разработке являлось простота использования поверителем и невозможность влияния на результат.

Выполняемые функции ПО АПК, с которым будет работать поверитель:

- управление калибраторами Fluke и Transmille по интерфейсам GPIB, RS232 и USB;
- считывание результатов с экрана мультиметра произвольного размера и с любым количеством символов;
- загрузка скриптов поверки и расчет допускаемой основной погрешности для точек поверки;
- поверка каждой точки на соответствие допускаемой погрешности;
- формирование отчета с таблицами результатов по каждому параметру, дополнительной информацией и итоговому заключению о соответствии;

В ПО реализованы уникальные алгоритмы машинного зрения. Оно точно устанавливает момент, когда показания мультиметра установились, затем производит выборку и рассчитывает медианное значение. Большинство ПО для автоматизации измерительных процессов считывает одно показание через фиксированное время, что затягивает процесс в целом и снижает достоверность считанной информации в случае нестабильности показаний. В цифровых мультиметрах измерение напряжения происходит очень быстро, а измерение большого сопротивления очень медленно. Разработанный алгоритм работает как человеческий мозг: оценивается скорость изменения процесса, подбирается размер плавающего окна для анализа и ожидается, пока скорость процесса прекратит изменяться. Алгоритмы машинного зрения позволяют интерпретировать показания мультиметров с «сильно загрязненными» экранами с высочайшей точностью.

Простой интерфейс пользователя АПК MultiTess позволяет быстро произвести основные настройки и запустить поверку.

Рассмотрим поверку цифровых мультиметров подробнее.

Для начала подключаем мультиметр к калибратору (Fluke, Transmille), загружаем скрипт поверки (текстовый файл, содержащий точки поверки, допуски диапазоны и др.), Вносим всю необходимую информацию по поверяемому средству измерения (в данном случае по цифровому мультиметру). Нажимаем «СТАРТ» и следуем инструкциям ПО (переключение диапазонов на мультиметре, изменение электрической схемы поверки).

По завершении процедуры поверки будет составлен и сохранен протокол поверки в

форматах Word и/или PDF. Протоколы формируются на основе шаблонов в формате Word и пользователь может очень просто менять, добавлять любую информацию в шаблон. По окончании каждой поверки, выполненной с положительным результатом, связанные с ней данные хранятся в соответствующей базе данных. Пользователь имеет подробную документированную информацию о статусе поверки, ее истории.

АПК MultiTess поддерживает работу с мультиметрами как с автоматическим, так и с ручным переключением диапазонов.

Концепция АПК MultiTess позволяет исключить возможность влияния поверителем на настройки и поведение ПО. Пользователю-поверителю доступны только базовые настройки, не влияющие на результаты, так же имеется возможность смены пароля.

АПК MultiTess позволяет автоматизировать

- бюро приемки
- управление лабораторией
- контроль выполнения работ
- учет рабочего времени
- анализ деятельности загруженности
- рабочие места по поверке СИ и испытаниям оборудования
- составление протоколов и свидетельств

- учет рабочих мест, СИ  
 - документооборот и хранение протоколов  
 - учет образцов/СИ и выполненных работ  
 Поверяемые параметры для мультиметров представлены в виде:

- Постоянное/переменное напряжение
- Постоянный/переменный ток
- Сопротивление
- Емкость
- Индуктивность
- Частота
- Температура

Подводя итог, рассмотрим преимущества использования автоматизированной поверки цифровых мультиметров:

- Значительное увеличение скорости поверки
- Электронное формирование и хранение протоколов
- Полное соблюдение методики поверки и объективность результатов измерений
- Уменьшение сроков окупаемости эталонов/СИ
- Возможность подключения к метрологической базе данных для обеспечения комплексной автоматизации в лаборатории.

УДК 006.91

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОТБОРА ПРОБ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ В ИЗМЕРЕНИЯХ

Клевитская Е.Д.<sup>1</sup>, Демидов И.В.<sup>2</sup>, Савкова Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный центр аккредитации  
Минск, Республика Беларусь

В аналитической химии измерение подразумевает чаще всего процесс отбора и подготовки проб. Анализ пробы, отобранной некорректно, обязательно приведет к принятию на его основе неверных решений. Часто отбор проб производят не сотрудники лаборатории, что несет за собой потерю информации о процессе отбора. Существуют два основных подхода к оцениванию неопределённости, связанной с отбором проб: эмпирический и модельный.

Основной принцип эмпирического подхода – определение оценок правильности и прецизионности. Существуют пять способов его реализации: метод двойных проб, метод разных схем, метод совместных исследований, проверка квалификации при отборе проб и вариографический метод. Все они сводятся к тому, что производится многократный отбор проб и анализ при разных условиях, что учитывает варьирование влияющих факторов. Статистическая модель для описания соотношения между истинным и одним

измеренным значением концентрации аналита в одной пробе (составной или одиночной) выглядит следующим образом:

$$x = X_{true} + \varepsilon_{sampling} + \varepsilon_{analysis}, \quad (1)$$

где  $X_{true}$  – истинное значение концентрации аналита в целевом объекте [1],  $\varepsilon_{sampling}$  – суммарная погрешность, обусловленная отбором пробы,  $\varepsilon_{analysis}$  – суммарная погрешность анализа.

Дисперсия результата измерения для единичного целевого объекта, если источники дисперсии независимы, описывается уравнением:

$$\sigma_{meas}^2 = \sigma_{sampling}^2 + \sigma_{analysis}^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_{sampling}^2$  – дисперсия между пробами из одного целевого объекта (в большей мере обусловленная неоднородностью аналита),  $\sigma_{analysis}^2$  – дисперсия результатов анализа одной пробы.

Если для аппроксимации использовать статистические оценки дисперсии  $s^2$  получаем

$$s_{meas}^2 = s_{sampling}^2 + s_{analysis}^2. \quad (3)$$

Стандартную неопределенность  $u$  можно оценить через  $s_{meas}$ :

$$u = s_{meas} = \sqrt{s_{sampling}^2 + s_{analysis}^2}. \quad (4)$$

Дисперсию, связанную с физической подготовкой пробы можно выразить отдельным членом уравнения (4) или включить в дисперсию отбора пробы.

В случае анализа нескольких целевых объектов модель нужно расширить:

$$x = X_{true} + \varepsilon_{target} + \varepsilon_{sampling} + \varepsilon_{analysis}. \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{target}$  – это суммарная погрешность рассеяния концентрации между целевыми объектами и имеет дисперсию  $\sigma^2_{between-target}$ .

Пользуясь методами дисперсионного анализа ANOVA [2] получаем оценки дисперсий  $\sigma^2_{between-target}$ ,  $\sigma^2_{sampling}$  и  $\sigma^2_{analysis}$ . Неопределенность оценивается аналогично вышеописанному случаю с помощью уравнения (1):

$$\sigma_{total}^2 = \sigma^2_{between-target} + \sigma^2_{sampling} + \sigma^2_{analysis} \quad (6)$$

Для удобства на практике дисперсии заменяют их оценками и получают

$$s_{total}^2 = s^2_{between-target} + s^2_{sampling} + s^2_{analysis}. \quad (7)$$

Для аналитической химии наиболее простым для реализации является метод двойных проб. Один отборщик повторяет отбор небольшой части первичных проб (примерно 10 %, но не менее чем из восьми объектов). Если есть только один объект, то все восемь двойных проб отбираются непосредственно из него, но в этом случае оценка неопределенности будет описывать только этот объект. Обе повторные пробы подвергают физической подготовке и получают две отдельные тестовые пробы. Из каждой тесовой пробы получают по две тестовые порции и затем анонимно выполняют химический анализ в условиях сходимости.

Следует учесть, что данный «сбалансированный план» не учитывает какое-либо смещение, связанное с отбором проб. Если в прошлом лаборатория уже получала оценку аналитической части неопределенности измерения в другом эксперименте, то можно проверить, близка ли сходимость, полученная в этом эксперименте к сходимости, полученной ранее. Второй вариант – использовать оценку смещения, полученную с использованием стандартных образцов. Эту оценку затем можно объединить со сходимостью и получить неопределенность измерения. Случайную составляющую неопределенности можно оценить с помощью дисперсионного анализа ANOVA путем объединения двух оценок  $s_{sampling}$  и  $s_{analysis}$ .

Расширенная неопределенность для доверительной вероятности 95% вычисляется по формуле:

$$U = 2s_{meas}. \quad (8)$$

$U$  можно выразить как относительную расширенную неопределенность по отношению к полученному значению  $x$  в процентах:

$$U = 100 \frac{2s_{meas}}{x} \%. \quad (9)$$

Аналогично (9) можно выразить относительную расширенную неопределенность для отбора пробы и анализа по отдельности:

$$U = 100 \frac{2s_{sampling}}{x} \% \text{ и } U = 100 \frac{2s_{analysis}}{x} \%.$$

Исследования, проводимые в рамках системы менеджмента окружающей среды, показали, что составляющие неопределенности, связанные с различиями между операторами и разными схемами отбора зачастую намного меньше, чем составляющие, связанные с гомогенностью целевого объекта.

Используя метод двойных проб, мы получаем количественное подтверждение качества отбора проб, а не просто полагаемся на предположение о том, что при правильно проведенной схеме отбора пробы окажутся репрезентативными. Главным недостатком подхода – необязательности определения каких-либо отдельных составляющих неопределенности, что ведет к завышению оценки неопределенности, которая не характерна большинству измерений. Этот эффект может быть минимизирован применением робастной статистики. Модельный подход основан на заранее заданной модели. Важным элементом этого подхода является бюджет неопределенности, облегчающий учет составляющих, их анализ, позволяющий в дальнейшем осуществить менеджмент измерительного процесса в направлении повышения достоверности получаемых результатов. Для оценивания неопределенности, связанной с отбором проб было предложено применить теорию отбора проб – например, теоретическую модель Пьера Ги [3].

Большинство погрешностей отбора пробы связаны с неоднородностью природы материала (НП) и неоднородностью распределения (НР). По модели Ги полная погрешность измерения ( $GEE$ ) складывается из двух составляющих:

$$GEE = TSE + TAE, \quad (10)$$

где  $TSE$  – суммарная погрешность отбора пробы,  $TAE$  – суммарная погрешность анализа.

$$TSE = (PSE + FSE + GSE) + (IDE + IXE + IPE) + SWE, \quad (11)$$

где  $PSE$  – погрешность выбора точки отбора,  $FSE$  – фундаментальная погрешность отбора пробы,  $GSE$  – погрешность группирования и сегрегации,  $IDE$  – погрешность границ инкремента,  $IXE$  – погрешность извлечения инкремента,  $IPE$  –

погрешность подготовки инкремента и пробы,  $SWE$  – погрешность присвоения веса.

$IDE$ ,  $IXE$ ,  $IPE$  и  $SWE$  – это погрешности некорректного отбора пробы, некоторые из них можно отнести к грубым промахам по GUM [4], поэтому их не следует включать в оценку неопределенности. Для их исключения следует помнить, что эти погрешности создают смещение отбора пробы, которое ведет к увеличению дисперсии непредсказуемым способом. Лучший способ их исключить – это поддерживать измерительное оборудование, методики отбора проб и анализа, а также персонал на должном уровне.

Если погрешности от некорректного отбора пробы устранены, то оставшиеся погрешности можно смоделировать для дальнейшего оценивания неопределенности.

$FSE$  – зависит от числа критических частиц в пробах. Для однородных газов и жидкостей эта погрешность крайне мала, однако для твердых веществ, порошков и дисперсных материалов она может быть очень большой. Если физическая подготовка пробы проведена корректно, то  $FSE$  можно использовать для оценивания составляющих дисперсии, возникающих на этапах подготовки. Если предполагаем число критических частиц в пробе можно оценить функцией размера пробы, то можно использовать

биномиальное распределение или распределение Пуассона как модели отбора пробы. В случае отсутствия такой информации требуется предварительное детальное исследование минерального состава, размера зерен и формы существования аналита в материале. Это относится к недостатку модельного подхода, так как он требует оценок или идеализированных допущений относительно восьми типов погрешности отбора проб.

Вывод: эмпирические методы являются применимыми для разных материалов, их реализация требует меньше затрат. Модельные подходы дают более детальную оценку известных источников неопределенности и подходят для применения в течение длительного времени в рутинной деятельности лаборатории.

1. Report of the 4<sup>th</sup> Asian Mathematical Conference (AMC 2005)/ Mathematical Medley. Volume 32, №2 December 2005, pp. 25-26.
2. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. 2nd edition. EURACHEM. LGC, 2000. – 120 p.
3. Pitard F F (1993) Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice. CRC Press, Boca Raton, 2nd edition.
4. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva (2nd printing, 1995).

УДК 535.5

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Скалацкая И.Е.

Санкт-Петербургский горный университет  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Эллипсометрия – высокочувствительный прецизионный поляризационно-оптический метод исследования поверхностей и границ раздела различных сред (твердых, жидких, газообразных), основанный на изучении изменения состояния поляризации света после взаимодействия его с поверхностью границ раздела этих сред.

Хотя указанные изменения можно наблюдать как в отраженном, так и в проходящем свете, в большинстве случаев изучается поляризация отраженного света. Поэтому обычно в эллипсометрии подразумевают изучение изменений поляризации света при отражении.

Основное уравнение эллипсометрии связывает все компоненты поля:

$$(E_{отр}^{(p)}/E_{пад}^{(p)})/(E_{отр}^{(s)}/E_{пад}^{(s)}) = R^p/R^s = F(\lambda, \varphi; d, n, k). \quad (1)$$

В зависимости от математической модели исследуемой оптической системы, с которой поляризованный свет испытывает взаимодействие, функция  $F(\lambda, \varphi; d, n, k)$  в (1) может быть выражена не только через классические коэффициенты Френеля для идеальных границ, но и

через их более сложную комбинацию так называемых обобщенных комплексных коэффициентов  $R^p, R^s$  Френеля, которая сводится в комплексных переменных к стандартному виду модуля  $|F|$  и аргумента  $(\Delta)$ , и на опыте непосредственно определяется с помощью эллипсометрических приборов в угловых поляризационно-оптических параметрах  $\Psi(\lambda, \varphi)$  и  $\Delta(\lambda, \varphi)$ :

$$F = |F| \exp\{i \arg(F)\} = \text{tg}(\Psi) \exp\{i\Delta\}. \quad (2)$$

Функции  $\Psi$ - $\Delta$  (2) это амплитудно-фазовые параметры светового поля [1].

В методе эллипсометрических  $\theta$ -измерений используется классическая схема скрещенных поляризаторов при косом падении коллимированного пучка света ( $\lambda=632.8$  нм) на объект исследования (ОИ).

Эллипсометрия обладает существенными преимуществами перед другими методами, поскольку для исследования свойств тонких пленок и граничных слоев этот поляризационно – оптический метод не требует специальной подготовки поверхности, позволяет вести наблюдения за поверхностями при различных

физических условиях (любых давлениях, широких интервалах температур). Также по сравнению с энергетической ноль-диагностикой с большими погрешностями (в нуле), эллипсометрические методы обладают очень высокой чувствительностью измерений амплитудно-фазовых параметров светового поля, испытавшего взаимодействие со средами веществ и изменившим состояние своей поляризации в областях вариаций фаз  $\Delta$  до  $360^\circ$ , а амплитуд в угловых параметрах  $\Psi$  – до  $90^\circ$ .

Объектом исследования в эллипсометрии являются оптические параметры всевозможных материалов – показатели преломления ( $m$ ) в комплексном виде  $m = n - ik$  ( $i^2 = -1$ ), состоящие из показателей рефракции ( $n$ ) и поглощения ( $k$  – светоослабления или экстинкции).

Таким образом, востребованность прецизионных эллипсометрических приборов для современных нанотехнологий высока и актуальность их метрологического обеспечения столь же важна и значима.

Системный анализ аналитических свойств решений основного уравнения эллипсометрии позволил предложить целый ряд методологических рекомендаций по интерпретации результатов эллипсометрических измерений в поляризационно-оптическом материаловедении [2].

Рассмотрены аналитические предпосылки существования и сформулированы новые инварианты Френеля – Брюстера: постоянство величины отношения  $\Psi_{\min} / k$  при фиксированном значении вещественного показателя преломления:

$$\frac{\Psi_{\min}}{k} = \frac{(1 + \vartheta)(n^2 + 1)}{4n^3 \delta} \xrightarrow{\text{псевдо Брюстер}} \frac{n^2 + 1}{4n^3} = \text{const}(n) .$$

Практическая ценность новых инвариантов состоит в новой методике определения величины  $k$  (светоослабления) при заданном вещественном показателе преломления  $n$  и определённом значении минимума амплитудной функции  $\Psi$  (в угле Брюстера или псевдо Брюстера для поглощающих сред). Принято считать, что понятие экстинкции (дословно – ослабление света) шире понятия простого поглощения светом веществом. Она может включать в себя и дополнительные механизмы потери света в заданном направлении за счет реального рассеяния на точечных (молекулярных) или структурных (энтропийных) дефектах вещества. Ещё одно новое из методических направлений в эллипсометрии связано с в оптическом диапазоне длин волн (АО) [3]. Это явление обнаруживается в зависимости сигнала гашения ФЭУ при скрещенных поляризаторах от углов падения излучения (рис. 1), когда на скользящих углах проявляется его завышение над общим фоном, подобное регистрации лучей аномального отражения в рентгенооптике (эффект Ионеды) [4]. Следует ожидать, что АО в поляризационно-оптическом методе, способно

регистрировать запредельно низкие уровни шероховатости зеркал.

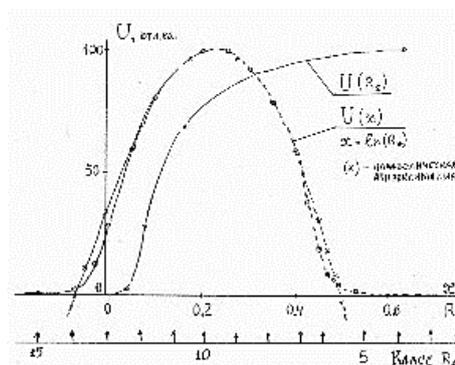


Рисунок 1 – Обобщённый анализ оптической шероховатости материалов

$$U(x) = -14,057X^2 - 7,785X + 104,393 \quad (3)$$

Результатом системного анализа многочисленных экспериментальных данных является аппроксимационная зависимость сигнала ФЭУ от степени (класса) шероховатости образцов. Выявленная зависимость (3) является статистическим законом оценки уровня шероховатости в параболической аппроксимации для сигналов аномального отражения поляризованного света, не погашаемого в простой схеме скрещенных поляризаторов. Она позволяет экстраполировать данные не только для средних значений  $R_z$ , но и оценить шероховатости диффузно рассеивающих образцов.

В качестве новой рассмотрена методика постановки задачи для исследований кинетических методов эллипсометрии для медико-биологических и динамически необратимых процессов.

В частности, рассмотрена постановка задач для исследования биоматериалов методом релаксационной ФЭУ-эллипсометрии [3]. Диагностика физико-химических и медико-биологических свойств био-материалов в нано-масштабе их линейных размеров порядка сотен нанометров в отличие от масштаба макроскопических длин в биосредах или их физиологических растворах может привести к открытию принципиально новых явлений и свойств исследуемых материалов. По данным эксперимента и их анализу предлагается обоснование эффекта Белоусова-Жеботинского, являющегося, по-видимому, основным механизмом сложной клеточной релаксационной динамики вирусного обнаруженным явлением аномального отражения транспорта в реакциях образования комплекса антиген-антитело во времени с собственной биоритмикой иммуноферментных взаимодействий. Эллипсометрический контроль ВИЧ-кинетики рассматривался на примере тест-систем на СПИД: регистрировалась кинетика процессов, происходящих во всей системе и её частях.

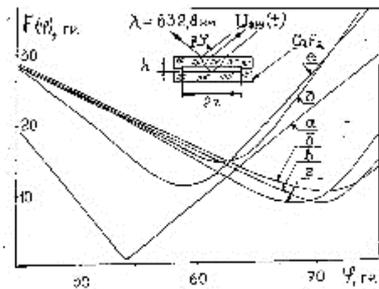


Рисунок 2 – Амплитудная функция  $\Psi$  при отражении от слабых растворов: на диэлектрике (кривая «а» – от верхней части оптической ячейки из  $\text{CaF}_2$ ); на физрастворе (кривая «е» - от верхней части кюветы и «д» - нижней); на растворах аВ и аГ сверху («г» ~ аВ, «в» ~ от аГ и «б» ~ смеси аВ+аГ)

Контрольная проверка характеристик  $\Psi$ - $\Delta$ , представленная на рис. 2, показала их типовой характер для кюветы из кубического кристалла  $\text{CaF}_2$  и испытуемых жидкостей на основе физиологических растворов поваренной соли. Видно, что амплитудные функции имеют характерный минимум при углах псевдо Брюстера, наиболее глубокий для чистого диэлектрика – кристалла  $\text{CaF}_2$  (в идеале равный 0) и характерными сдвигами в область больших углов для веществ с большим показателем рефракции ( $n = \text{tg } \varphi_{\text{min}}$ ).

УДК 621.382

### СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЗСТЕР И ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Васьков О.С.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>1</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Соловьев Я.А.<sup>2</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО Интеграл, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время анализ тепловых параметров полупроводниковых приборов производится с помощью теплового тестера ТЗSter (Thermal transient tester) компании MicRed (US) [1] и его аналогами в рамках стандарта JESD51-14 [2]. В основе метода, разработанного MicReD, лежит измерение временной зависимости теплового импеданса прибора (рассчитанного из изменения его прямого смещения) и построение кумулятивной и дифференциальной структурных функций (зависимостей теплоемкости и производной от нее от теплового сопротивления по структуре, соответственно). График релаксации динамического теплового импеданса представляет спектр постоянных времени, соответствующих элементам структуры приборов, по которым распространяется тепловой поток. Структурные функции зависимости рассчитываются посредством алгоритма деконволюции спектра постоянной времени в частотную область с фильтрацией на основе алгоритма Ферми–Дирака

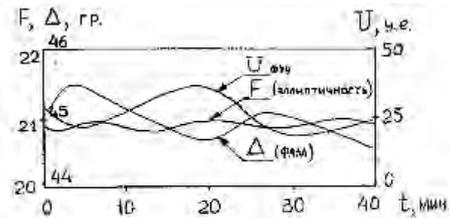


Рисунок 3 – Наблюдение во времени  $U_{\text{физ}}(t)$  и  $\Psi$ - $\Delta$  параметров при  $\varphi=45^\circ$

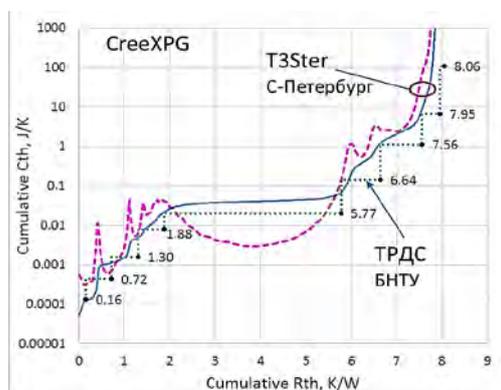
Вариации во времени размахов измеряемых величин на рис. 3, оказались не ошибками измерений, а кинетической развёрткой процессов комплексообразования в тест-системе  $aG + aB = GB\text{-complex}(t)$ . Детальный анализ за длительный период (суточные измерения) поведения раствора ( $aG + aB$ ) позволили установить автоволновые режимы в этой системе.

1. Горшков, М.М. Эллипсометрия. – М.: Радио, 2004. – 200 с.
2. Поляризационно-оптические методы исследования: учеб. пособие / Е.К.Скалецкий [и др.] – СПб.: Университета ИТМО, 2015. – 137 с.
3. Скалецкая, И.Е. Методы и средства поляризационно-оптической диагностики в наноматериаловедении: автореф. дис... канд. техн. наук / И.Е.Скалецкая. – СПб.: СПбГУИТМО, 2008. – 27 с.

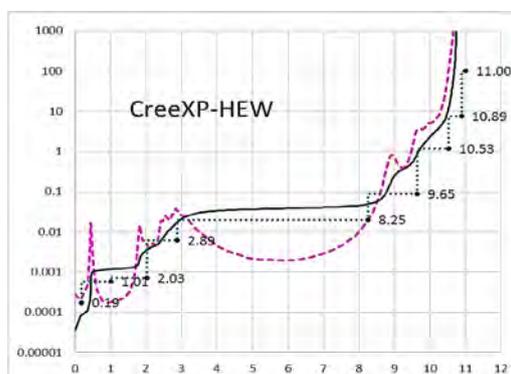
(стандарт JESD51-14 [2]). Затем из их анализа определяется эквивалентная электротепловая модель прибора в рамках схемы Кауера, которая наиболее соответствуют реальной физической структуре теплового сопротивления измеряемого объекта. Данный метод основан на сложных многоступенчатых преобразованиях, что приводит к накоплению систематических ошибок и, как следствие, потере точности [3].

Альтернативный подход заключается в использовании для анализа временной зависимости теплового импеданса метода тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС), разработанного в БНТУ [4,5]. В методе ТРДС, в отличие от ТЗSter, вывод результатов измерений тепловых параметров, полупроводниковых приборов осуществляется в виде временного спектра тепловых параметров, подобному обычным видам спектра, например, оптическому. В отличие от ТЗSter в методе ТРДС используется ори-

гинальный алгоритм прямого дифференциального преобразования переходных уравнений динамического теплового импеданса в электротепловые модели во временной области, минуя частотные преобразования.



а)



б)

Рисунок 1 – Сравнение методов Т3Ster (MicRed) и ТРДС (БНТУ) электротепловых структурных функций диодов Cree типа XPG (а) и XP-HEW (б). Штриховая линия – дифференциальная структурная функция, непрерывная – кумулятивная структурная функция, полученная с использованием Т3Ster, ступенчатая штриховая – кумулятивная структурная функция ТРДС

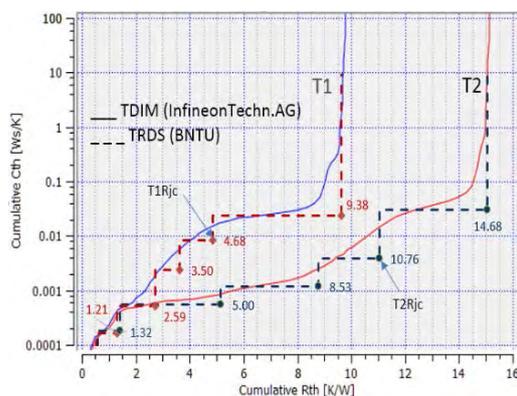


Рисунок 2 – Транзисторы Т1 и Т2 типа КТ817А в корпусе DPAK с различным внутренним тепловым сопротивлением. Сравнение структурных функций, полученных программой TDIM–Master по методу Т3Ster/MicRed, и по методу ТРДС (БНТУ)

Методом ТРДС определяются внутреннее тепловое сопротивление прибора и его структура в виде дискретного  $\Sigma R_{th}(\tau_i)$  ( $\tau_i$  – постоянные времени тепловой релаксации элементов структуры прибора) и непрерывного (дифференциального) спектра  $R_{th}(t)$ , а также профили распределения эффективного сечения  $S_a$  теплового потока от активного слоя к корпусу прибора [5]. Дифференциальный (непрерывный) спектр определяется на основе производных более высоких порядков от динамического теплового импеданса в рамках модели Фостера, а дискретный, более соответствующий физической структуре прибора, в рамках модели Кауера. Максимальное разрешение ТРДС спектров достаточно для построения 12-ти-звенных электротепловых RC-моделей, что существенно превышает возможности метода Т3Ster. Принципиальным преимуществом перед методом Т3Ster является реализованный в ТРДС эффективный метод измерения площади теплового потока в кристаллах полупроводниковых приборов (т.е. их активной области), основан на временном анализе диффузии теплового потока (в одномерном полубесконечном приближении) из измерений дифференциальной температуры перегрева полупроводникового кристалла в начальный (нагрев/остывание) временной интервал  $\leq 100$  мкс.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ определения тепловых параметров светодиодов фирмы Cree и мощных полевых транзисторов КТ817 с разным качеством посадки кристалла в корпусе DPAK методами Т3Ster и разработанной методикой на основе метода ТРДС, позволяющей получить тепловые структурные функции используемые в методе Т3Ster.

Измерения проводились во временном интервале, соответствующем времени релаксации тепла на внутреннем тепловом сопротивлении  $R_{jc}$  исследуемых приборов. Для удобства сравнения с методом Т3Ster структурные зависимости по методике ТРДС на рисунках 1–2 выполнены в виде ступенчатой функции. Для всех образцов использовались два варианта измерений и расчета структурных функций.

1. Измерение и расчет структурных функций светодиодов производились на оригинальном оборудовании Т3Ster (MicRed) в центре микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН (Санкт-Петербург) и, для сравнения, в Минске на оборудовании, разработанном в БНТУ [6] и использующее метод ТРДС. Результаты измерений представлены на рисунке 1.

2. Измерение динамического импеданса  $Z_{th}$  транзисторов производилось на оборудовании ТРДС, расчет структурных функций по методу Т3Ster производился программой TDIM-Master [2] и, для сравнения, производился расчет структурных функций методикой ТРДС. Результаты измерений расчетов для транзисторов КТ817А представлены на рисунке 2.

Таким образом, как видно из результатов сравнения на рисунках 1-2, структурные функции, полученные разработанной методикой на основе метода ТРДС и методом T3Ster, достаточно хорошо совпадают. Вместе с тем, как отмечалось выше методика ТРДС позволяет проводить обработку результатов тепловых измерений с более высокой точностью.

1. MicRed, T3Ster. – <http://www.mentor.com/products/mechanical/mired/t3ster/>.
2. Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction-to-case of semiconductor devices / JEDEC Standard JESD51-14,

- [www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14\\_1.pdf](http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14_1.pdf) (November 2010).
3. Smith, B. Utility of transient testing to characterize thermal interface materials / B. Smith [et al.] // EDA Publishing THERMINIC. – 2007. – P. 6–11.
  4. Bumai, Yu.A. Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes / Yu.A. Bumai, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko // Metrology and Measurement Systems. - 2010. - Vol. 17, No. 1. - P. 39–46.
  5. Васьков, О.С. Метод тепловой релаксационной спектроскопии и определение параметров светодиодов / О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В.С. Нисс // Докл. БГУИР. – 2011. – № 4. – С. 74–79.
  6. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай [и др.] // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.

УДК 691.7

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ И МАРКИРОВКЕ ЕЕ ЗНАКОМ «СЕ» В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Купреева Л.В., Солодухо Ю.А.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в Республике Беларусь на фоне общего экономического кризиса наблюдается тенденция снижения производства продукции и оказания услуг. В связи с этим отечественные производители строительной продукции стремятся расширить собственные рынки сбыта и переориентировать производство в сторону стран ЕАЭС и Европейского союза. Основной проблемой, с которой сталкиваются при этом белорусские организации, являются вопросы подтверждения соответствия выпускаемой продукции, а также выполняемых ими работ или оказываемых услуг требованиям, установленным в соответствующих документах данных интеграционных образований.

Решение существующей проблемы в строительной отрасли требует комплексного подхода. Во-первых, размещение и/или ввод в эксплуатацию в странах ЕС строительной продукции, в частности, металлоконструкций, третьими странами реализуется через обязательное прохождение продукцией процедуры оценки соответствия основополагающим требованиям Директив ЕС Нового и Глобального Подхода с последующей маркировкой знаком СЕ. Во-вторых, при проведении сварочных работ металлоконструкций устанавливаются определенные квалификационные требования в отношении персонала, выполняющего данный вид работ. В-третьих, для осуществления СЕ маркировки строительной продукции необходимо наличие в стране аккредитованных органов по сертификации конкретных категорий/видов данной продукции и работ, в частности металлоконструкций и сварочной деятельности.

Исходя из вышеизложенного, нами были идентифицированы и проанализированы действующие законодательные акты, ТНПА и документы в области технического нормирования и стандартизации, устанавливающие требования не только к строительным металлоконструкциям (стальным и алюминиевым) и выполнению сварочных работ, но и к квалификации персонала, осуществляющего данные работы.

Проведенный анализ показал, что в Республике Беларусь маркировка строительной продукции знаком СЕ осуществляется в рамках «Соглашения о сотрудничестве при подтверждении соответствия взаимно поставляемой продукции», подписанного Госстандартом в 2004 году, а также требования, устанавливаемые к строительным материалам, изделиям и работам в строительстве, подлежащим подтверждению соответствия существенным требованиям безопасности регламентируются действием технического регламента ТР 2009/013/ВУ.

Для экспорта на рынок ЕС определенных видов строительных материалов, в частности, стальных и алюминиевых металлоконструкций, обязательным условием (согласно Регламенту Европейского Парламента и Совета 305/2011/EU) является наличие маркировки знаком СЕ, которая осуществляется посредством подтверждения соответствия требованиям стандартов EN серии 1090. В данных евронормах устанавливаются требования к оценке соответствия эксплуатационных характеристик стальных и алюминиевых конструкций, наличие документации и спецификаций, необходимых для изготовления соответствующих металлоконструкций и их элементов, а

также предъявляются требования к подготовке, монтажу металлоконструкций, обработке их поверхностей, геометрическим допускам, контролю, испытаниям готовой продукции и выполнению сварочных работ.

В настоящее время в нашей стране приняты и действуют идентичные европейским нормам государственные стандарты СТБ EN 1090 (3 части), выполнение требований которых позволяет решить одну из возникших проблем. Кроме того, действует серия ТКП 45-5.04, устанавливающих правила расчета, изготовления, монтажа, обследования и диагностики технического состояния стальных конструкций, в том числе строительных конструкций (ТКП 45-5.04-121) и специальных (ТКП 45-5.04-217) сооружений.

В рамках проводимых исследований было также установлено, что важным этапом изготовления стальных и алюминиевых конструкций является выполнение сварочных работ, к обеспечению которых допускаются лица, имеющие соответствующую квалификацию.

Непосредственно требования к качеству сварки металлических материалов, включая критерии выбора соответствующего уровня требований к качеству (всесторонние, стандартные или элементарные), а также документы, которым необходимо соответствовать при заявлении соответствия требованиям к качеству, установлены серией СТБ ISO 3834.

В свою очередь, в соответствии с требованиями стандартов СТБ EN серии 1090 квалификационные требования предъявляются к лицам, которые делятся на три категории: сварщики, операторы сварки и персонал, выполняющий координацию сварочных работ (персонал надзора).

Сварщики стальных и алюминиевых конструкций должны аттестоваться на соответствие требованиям стандартов СТБ ISO 9606-1 и СТБ ISO 9606-2 соответственно. Дополнительно требования к квалификационным испытаниям и практическим навыкам сварщиков, проводимым по единым правилам на одинаковых контрольных сварных соединениях регламентируется СТБ EN 287-1. К квалификации операторов сварки требования устанавливаются согласно стандарту СТБ EN 1418. Анализ требований в отношении персонала, выполняющего координацию сварочных работ, показал, что предъявляемые квалификационные требования зависят от марки материала, его толщины и класса исполнения стальной или алюминиевой конструкции. Согласно стандарту EN 1999-1-1 существуют четыре класса исполнения конструкции, обозначаемых EXC1 – EXC4, причем требования ужесточаются от класса EXC1 к EXC4. Требования к квалификации персонала, выполняющего координацию сварочных работ, возрастают

по мере увеличения толщины материала и класса исполнения конструкции.

В соответствии с требованиями стандарта СТБ ISO 14731 специалисты, назначенные на должности в качестве координирующего персонала должны подтвердить свою компетентность на основании их опыта, образования и (или) квалификации в соответствии с предписанными им задачами.

Компетентность персонала в зависимости от вида знаний и опыта должна включать общетехнические знания и специальные технические знания в области сварки и родственных процессов, относящиеся к конкретным задачам, которые должны быть достигнуты сочетанием теоретических знаний, образования и (или) опыта. Технические знания персонала, определенные СТБ ISO 14731, обозначаются соответствующими буквами: В – базовые, S – специальные и С – всесторонние.

Таким образом, персонал надзора, ответственный за координацию сварочной деятельности, должен быть отнесен в зависимости от его компетентности и (или) вида и сложности производства к одному из следующих уровней:

- персонал надзора высшего уровня компетентности (со всесторонними техническими знаниями), если требуются полные технические знания для планирования, выполнения, контроля и испытаний всех предписанных задач и обязанностей при изготовлении сварных изделий);

- персонал надзора среднего уровня компетентности (со специальными техническими знаниями), причем уровень технических знаний должен быть достаточным для планирования, выполнения, контроля и испытаний всех предписанных задач и обязанностей при изготовлении сварных изделий в пределах определенного или ограниченного участка производства);

- персонал надзора базового уровня компетентности (с базовыми техническими знаниями), причем уровень технических знаний должен быть достаточным для планирования, выполнения, контроля и испытаний всех предписанных задач и обязанностей в пределах ограниченного участка производства, выполняющего только простые сварные конструкции.

Таким образом, можно утверждать, что на сегодняшний день в Республике Беларусь созданы необходимые условия с точки зрения нормативного обеспечения при проведении сварочных работ строительных металлоконструкций и квалификационных требований к персоналу, выполняющему данный вид работ.

Следует также отметить, что в соответствии с принятой европейской практикой в данной

области и согласно требованиям стандартов серии EN 1090 у подрядчика по изготовлению металлоконструкций должна быть разработана и внедрена не только действующая сертифицированная система менеджмента качества, но и необходимо наличие сертифицированной документированной системы управления качеством сварочного производства (WQMS) и ответственного координатора сварочных работ (RWC) в штате организации.

Основной нерешенной проблемой для отечественных строительных организаций является отсутствие аккредитованных органов по

сертификации на маркировку знаком CE определенных категорий (видов) строительной продукции, поэтому отечественным организациям приходится привлекать аккредитованные организации из-за рубежа. Актуальным вопросом при экспорте строительной продукции, производимой рядом организаций Республики Беларусь, в страны ЕАЭС и ЕС остается формирование и аккредитация органа, способного выполнять работы по сертификации WQMS, проводить проверку соответствия остальных требований стандартов EN серии 1090 и осуществлять процедуру подтверждения соответствия определенных категорий стройматериалов.

УДК 006.91.531

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГРАФИЧЕСКИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

**Лысенко В.Г., Борис В.С.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В предлагаемой вашему вниманию статье описаны разработанные и используемые на кафедре «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета мультимедийные средства обучения в виде мультипликаций с использованием различного программного обеспечения. Эти программы имеют разные уровни иллюстративности и абстрагирования. Например, программное обеспечение Flash-Macromedia позволяет создавать интерактивные средства обучения, в то время как КОМПАС-3D представляет объекты, приближенные к реальному виду технических устройств.

В интерактивных программных средствах пользователь имеет возможность изменять численные значения параметров модели по своему усмотрению или по предлагаемому закону и наблюдать изменения в функционировании системы в результате изменения параметров. Мультимедиа-технологии позволяют обеспечивать взаимодействие лектора и обучаемого, индивидуального пользователя и компьютера, открывая при этом новые возможности в области образования. В компьютерных учебно-методических комплексах можно использовать мультимедийные средства обучения в виде мультипликаций с использованием программного обеспечения либо в виде интерактивных моделей реальных систем. Часть таких средств выполнены как обычная мультипликация, а другая часть – как интерактивные модели реальной системы. В них пользователь имеет возможность изменять численные значения параметров модели по своему усмотрению или по предлагаемому закону

и наблюдать изменения в функционировании системы в результате изменения параметров. При реализации процесса проектирования средств измерений на практических занятиях или его имитации на лекциях особый интерес представляет моделирование возникновения и изменения погрешностей средств измерений, имеющих систематический характер для конкретного экземпляра средства измерений. В некоторой степени утрированные интерактивные модели дают возможность наглядно представить механизм образования погрешности, возможности управления её значениями и компенсации, а в некоторых случаях привести к решению об отказе от исследуемого варианта конструкции. При компьютерном моделировании отпадает необходимость разработки и изготовления экспериментальных установок, а также проведения экспериментальных исследований, что требует намного больше ресурсов, причем как технических и интеллектуальных, так и временных.

В компьютерных учебных, исследовательских и производственных информационных технологиях можно использовать программное обеспечение АСКОН (например, КОМПАС-3D – систему трехмерного моделирования для создания интерактивных моделей реальных систем), AutoDesk (например, AutoCAD для создания интерактивных моделей реальных систем) и Adobe Flash мультимедийная платформа для создания веб-приложений или мультимедийных презентаций. При использовании программ обеспечивается высокая наглядность процесса возникновения погрешности, однако в этом случае обучаемый является лишь наблюдателем и не может

участвовать в процессе. Использование программ Flash-Macromedia позволяет пользователю не только наблюдать за процессом возникновения погрешности, но и участвовать в этом процессе, изменяя численные значения параметров модели и наблюдая изменения в функционировании системы в результате изменения параметров. При этом в ролик может быть включена возможность расчёта наблюдаемой погрешности по заданным параметрам.

Система КОМПАС-3D V12 предназначена для создания двух- и трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология системы позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе однажды спроектированного прототипа. Ключевой особенностью «Компас-3D» является использование собственного математического ядра и параметрических технологий, разработанных специалистами АСКОН.

В данной статье графическое исследование погрешностей имеющих систематический характер при линейно-угловых измерениях было проведено примере контрольно-измерительных приспособлений для измерения полного радиального биения отверстия втулки и контрольного приспособления для контроля полного радиального биения поверхности ступенчатого вала.

На примере контрольного приспособления для контроля полного радиального биения отверстия проведены исследования инструментальной погрешности, с помощью программного обеспечения КОМПАС-3D.

Все наши компьютерные модели относятся только к инструментальным составляющим погрешности и только погрешностям, имеющим систематический характер. Инструментальная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

Обеспечивается вовлеченность пользователя в процесс исследования погрешностей, т.к. он является не просто наблюдателем, но и может участвовать в этом процессе, изменяя численные значения параметров геометрической модели и наблюдая изменения погрешности системы в результате изменения параметров.

Рассмотрим контрольное приспособление для контроля полного радиального биения отверстия детали (рисунок 1). Проведем оценку инструментальной погрешности с помощью теоретического расчета и практически, с

помощью программного обеспечения КОМПАС-3D.

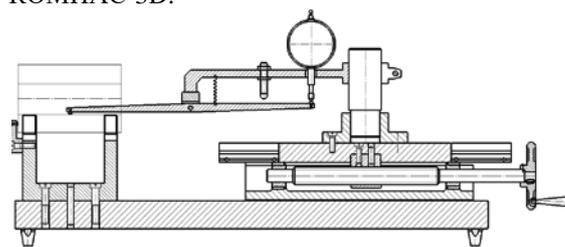


Рисунок 1 - Контрольное приспособление для контроля полного радиального биения отверстия

Рассмотрим составляющие инструментальной погрешности измерений вызванные непараллельностью перемещения каретки и погрешность измерений, вызванную отклонением от перпендикулярности оси стойки. Рассчитаем обе как разность координат конечного и начального положения наконечника.

Для наглядности изобразим погрешность утрированно, с большими допусками. Пусть каретка перекашивается на угол  $\alpha=1^\circ$  ( $\text{tg}\alpha = \frac{T}{L_{\text{кар}}}$ ), где  $T$  – допуск параллельности,  $L_{\text{кар}}$  – длина каретки.

Для оценки погрешности, которую вызовет данный перекосяк, зафиксируем горизонтальные координаты касания детали цилиндрическим наконечником на ее измеряемой длине  $l_{\text{дет}}$  в процессе измерения по траектории перемещения наконечника (рисунок 2).



Рисунок 2 – Перемещение наконечника по длине контролируемой детали

Измерим получившуюся экспериментальную погрешность измерений  $\Delta$ , вызванную непараллельностью перемещения каретки как разность координат  $Y$  конечного и начального положения наконечника.

Экспериментальную погрешность измерений, вызванную отклонением от перпендикулярности оси стойки оценим тоже как разность координат  $Y$  конечного и начального положения наконечника. Для данного случая экспериментальная погрешность

$$\Delta = Y1 - Y2 = 4,238055 \text{ мм.}$$

С целью визуализации механизма действия погрешностей, возникающих из-за отклонения от формы и расположения поверхностей используется мультимедийная платформа Macromedia Flash.

Измерение полного радиального биения. Погрешность, вызванная отклонением от перпендикулярности оси стойки

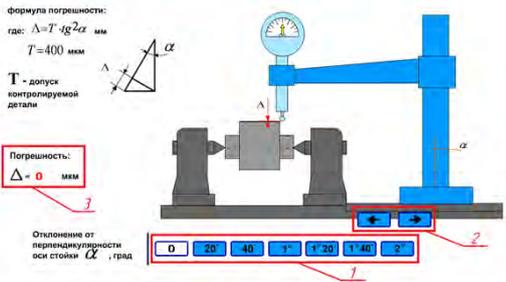


Рисунок 3 – Компьютерная визуализация погрешности, вызванной отклонением от перпендикулярности оси стойки контрольного приспособления (в мультимедийной платформе Macromedia Flash)

Рассмотрим составляющую погрешности измерений при измерении полного радиального биения – погрешность, вызванная отклонением от перпендикулярности оси стойки. В первоначальном положении ось стойки перпендикулярна основанию (рисунок 3).

При помощи кнопок на панели 1 (рисунок 3) задается отклонение от перпендикулярности в градусах, кнопки на панели 2 позволяют передвигать стойку в различных направлениях, причем Δ выдается на экран в виде численного значения (панель 3, рисунок 3). В результате применения данной методики обеспечивается высокая наглядность процесса возникновения погрешности и одновременно ее расчет

УДК 535.3

## THE UNCERTAINTY OF ANTHROPOMETRIC PARAMETERS MEASUREMENTS IN DIGITAL BIOMETRIC SYSTEMS

Saukova Y.<sup>1</sup>, Sutkovski M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarussian National Technical University  
Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Warsaw University of Technologies  
Warsaw, Poland

On the base of Warsaw University of Technologies in the 3D Technologies Laboratory scientific investigation of designed digital biometric systems are carried out. It is necessary to solve the task of metrological traceability in the part of uncertainty estimation.

**1 The measuring task.** The measurand is an anthropometric parameter namely the coordinates of the object (patient's body) in three-dimensional space. A series of characteristic anatomical points is marked on the examined body with special non-invasive markers. Analysis of the examined posture is performed as a series of parameters calculated on the base of the measured points of the body. Measurement is based on the determination of the digital image pixel coordinates corresponding to the object point relative to relative zero reference point. The relative zero reference point is normally assumed as one of the measured points – i.e. P<sub>0</sub> is denoted by reference (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>). Other points are represented as theirs relative position in space.

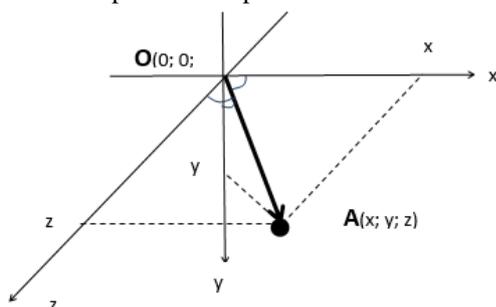


Figure 1 - Graphical description of the measurand

**2 The mathematical model and the data.** The anthropometric parameter namely coordinates (x, y, z) of the object ((point marked onto the examined' body) point in three-dimensional space represents the distance from relative point zero of the count down to the desired point and is determined by length of the vector OA. The model measurement result mathematical expectation has the form (look figure 1):

$$A_x = x - 0; A_y = y - 0; A_z = z - 0 \quad (1)$$

Noting the specificity of transformation from 2D to 3D spaces the correction factors  $k_x$  and  $k_y$  are entered for the z coordinates. A combined uncertainty of the measurand represents a locus of points (region) in 3D space and consists of uncertainties in each coordinate:

$$u_c(A) = \sqrt{u^2(x) + u^2(y) + u^2(z)} \quad (2)$$

**3 Analysis of the input quantities and their uncertainties.** Each input value (x, y, z) involved in the measurement process depends on other input quantities which are sources of variability. In general original models of mathematical expectations for each of the coordinates have (on example x) the following form:

$$x = x_{ind} + c_{x1} + c_{x2} + c_{x3} + c_{x4}, \quad (3)$$

where  $x_{ind}$  ( $y_{ind}$ ,  $z_{ind}$ ) – point estimates of the measurand;  $c_{x1}$  ( $c_{y1}$ ,  $c_{z1}$ ) – corrections on errors of measuring instruments;  $c_{x2}$  ( $c_{y2}$ ,  $c_{z2}$ ) – corrections on subjective errors;  $c_{x3}$  ( $c_{y3}$ ,  $c_{z3}$ ) – corrections on errors caused by the imperfection of the measurement method;  $c_{x4}$  ( $c_{y4}$ ,  $c_{z4}$ ) – corrections on errors caused by the influence of the measurement conditions.

It would be logically to assume the input values  $x$ ,  $y$ ,  $z$  have the same set of sources of variability. However, we should consider the fact that the 3D space is converted ultimately into a two-dimensional digital images. In this regard, the  $z$ -coordinate has an additional source (the correction factor) associated with this transformation. The variability factors (correction of error) were grouped according to sources of origin for analysis. The input quantities - point estimates of the measurand  $x_{ind}$ ,  $y_{ind}$ ,  $z_{ind}$  are determined experimentally as a mathematical expectation of  $n=2$  measurements according to the formula:

$$x_{ind} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

where  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  - the results of the  $i$ -th observation at a control point along the axes  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  respectively. Standard uncertainties  $u(x_{ind})$ ,  $u(y_{ind})$  и  $u(z_{ind})$  (on example of  $x$ -coordinate) are calculated as the standard deviation by the formulas:

$$u(x_{ind}) = \frac{x_i - \bar{x}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

For calibration of digital camera certified standard samples playback linear dimensions has been used in the measuring procedure. According to the standard samples certificate "tolerance playback linear dimensions horizontal ( $x$ -axis) is  $\pm\Delta_x$ , on a vertical  $\pm\Delta_y$ ". Taking the interval from  $-\Delta_x$  to  $+\Delta_x$  and  $-\Delta_y$  to  $+\Delta_y$  rectangular probability distribution the standard uncertainties are calculated according to the formulas [1]:

$$u(c_{x1}) = \frac{\Delta_x}{\sqrt{3}}; u(c_{y1}) = \frac{\Delta_y}{\sqrt{3}}; u(c_{z1}) = \frac{\Delta_z}{k_x k_y \sqrt{3}}, \quad (6)$$

where  $k_x$ ,  $k_y$  - correction factors used to convert from 3D to 2D space.

Input variable quantities - corrections on subjective errors  $c_{x2}$ ,  $c_{y2}$ ,  $c_{z2}$ . The human factor is not explicitly taken into account for this measurement task because the measurements are performed using an automated system. Input variable quantities - corrections on errors caused by the imperfection of the measurement method  $c_{x3}$ ,  $c_{y3}$ ,  $c_{z3}$  depend on several groups of factors: 1) applied technical means, equipment (digital camera, tripod, terminal, etc); 2) effects of sampling and quantization; 3) effects related to incorrect idealization of the object. The digital resolution of the camera is  $N \times M$  pixels in a two dimensional format. Given the scale of digital photography object's physical dimensions  $n \times m$  unit pixel can be reduced to geometrical parameters of the recorded scene. Thus, the area of digital image of  $n \times m$  pixels corresponds to a region of  $n \times m$  of some elementary fields of the recorded scene in a 2D format. It is necessary to consider the correction factors  $k_x$  and  $k_y$  for the  $z$  coordinates (3D). Thus, the geometric dimensions  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  and  $\Delta_z$  along the three coordinate axes correspond to each unit pixels. Elementary line segments ( $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  and  $\Delta_z$ ) for this

measurement task can be considered as the nominal level of sampling (discretization). Setting the rectangular probability distribution in the intervals  $\delta_x = x_{i+1} - x_i$ ,  $\delta_y = y_{i+1} - y_i$  and  $\delta_z = z_{i+1} - z_i$  the standard uncertainty (on example  $x$ -coordinate) can be calculated as a standard deviation by the formula:

$$u(c_{x31}) = \frac{x_{i+1} - x_i}{\sqrt{3}} = \frac{\delta_x}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Corrections of errors caused by the influence of the tripod mounts for digital camera  $c_{x32}$ ,  $c_{y32}$ ,  $c_{z32}$  are apriority taken into account in the measurement system calibration, therefore, they are explicitly in the model not present. The terminal does not introduce variability in the results of the measurements and is only used as a means of information display.

**Corrections of errors caused by incorrect idealization of the object and approximations  $c_{x34}$ ,  $c_{y34}$ ,  $c_{z34}$**  are accounted for by introducing in the model correction coefficients  $k_x$  and  $k_y$  which in fact are the sines of the angles between the vector  $OA$  and the coordinate axes  $Ox$ ,  $Oy$ . To display the axes  $Ox$  and  $Oy$  factors  $k_x = 1$  and  $k_y = 1$  and are treated as constants. For the axe  $Oz$   $k_x = \frac{OX}{OA}$  and  $k_y = \frac{OY}{OA}$ . If  $k_x$  and  $k_y$  are specified as constants their uncertainties are due to the geometric factor of the pixel two-dimensional graphics and calculated by formulas (8) out of the expressions for the rectangular probability distribution. Corrections on errors caused by the influence of the measurement conditions  $c_{x4}$ ,  $c_{y4}$ ,  $c_{z4}$  are apriority taken into account in the measurement system calibration, therefore, they are explicitly in the model not present. The input quantity the reference point "0" is determined during calibration using special tables. Its uncertainty  $u("0")$  is characterized by the uncertainty of the calibration tables and taken from the certificate (8).

**4 Covariance.** Undoubtedly, there are covariance between the input quantities, such as those associated with the presence of to determine each coordinate of the zero point of reference.

**5 The combined uncertainty of the measurand.** Given the above expression for standard uncertainties of the input quantities in absolute view get In the relative view:

$$\frac{u_c(A)}{A} = \sqrt{\frac{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2x^2} + \frac{(y_i - \bar{y})^2}{2y^2} + \frac{2u(x_i, y_i)}{u(x_i)u(y_i)} + \frac{2\Delta_x^2}{3x^2} + \frac{2\Delta_y^2}{3y^2} + \frac{u(\Delta_x, \Delta_y)}{3u(\Delta_x)u(\Delta_y)} + \frac{\delta_x^2}{3x^2} + \frac{\delta_y^2}{3y^2} + \frac{u(\delta_x, \delta_y)}{3(\delta_x)u(\delta_y)}}{}}$$

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Geneva (2nd printing 1995).

## THE TRACEABILITY OF LOCATION AS A KEY ASPECT OF PRODUCTS CONFIRMATION

Saukova Y.<sup>1</sup>, He E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarussian National Technical University  
Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Beijing Wuyue Huaxia Management & Technique Center  
Beijing, China

The traceability is the capacity to identify and track a foodstuff, a forage for animals, an animal or a substance intended or expected to be incorporated into a food or a forage, at all levels of production, processing and distribution. In accordance with this definition, traceability is a process that covers the entire supply chain and in which different companies collaborate to optimize the interfaces determined of various directions, domains and sub-processes. Therefore, in our opinion, this is the way to meet consumer expectations in terms of safety and quality of products. The current food safety policy is based on a number of principles which applied in accordance with the integrated approach „from farm to fork”, specifically include transparency, risk analysis and prevention, protection of consumer interests and the free circulation of safe and quality products in the internal market and in relation with other states. Food safety is, for the most part, subject to the environment state and resources: biodiversity; level of pollution; water, soil, resources; climate changes; human factors and globalization.

The traceability and quality of meat and meat products are requirements for domestic and European market, which require, in turn, an adequate infrastructure, equipments and service network [1]. The IOAS is a non-profit organisation dedicated to the integrity of ecolabel claims in the field of organic and sustainable agriculture, environmental management, social justice and fair trade. It works internationally to assess the competence of organizations providing certification to ‘sustainability’ standards such that producers can work in a fair environment and consumers can trust the products bearing these labels; our contribution to a more sustainable and fairer world. GB/T19630-2011 Standard for Organic Products is applicable for all organic products for sale in Chinese market, including domestic and imported products. The products can be sold legally as organic products in Chinese market only with certification of such standard. The standard consists of four parts, which respectively specified the requirements in the field of organic production, processing, marking, selling and management system. Beijing Wu Yue Hua Xia Management & Technique Center (hereafter referred to as “CHC”) is one of the earliest established organic food certification body in China, and it has been approved by Certification and Accreditation Administration of the People’s Republic of China (CNCA, Ref NO: CNCA-R-2004-129), and is also accredited by China National Accreditation Service For Conformity Assessment (CNAS, Ref NO: CNAS C133-O). It is

the member of China Certification & Accreditation Association (CCAA) and IFOAM. CHC is also the executive director member of China Chamber of International Commerce (CCOIC). Chen ZHAO, the director of CHC, is the executive chairman of Organic Industry Development Committee of CCOIC as well. Certification fields of CHC are Chinese organic product certification, Korean organic product certification, GAP certification, ISO22000 certification, HACCP certification. If a buyer wants to discover and control his whole supply chain, it will always be difficult in China. First, let’s say he wants to know the factory that takes care of final assembly. This is not as obvious as it sounds. Suppliers are not producers, and many producers sub-contract the manufacturing in the purchasers’ back.

Traceability dates back to as early as the 1930s when some European countries wanted to prove the origin of high-quality food such as French champagne. Over the past two decades, food safety related issues and various food scandals in the agribusiness sector, such as mad cow disease or the Asian bird influenza, have highlighted the importance of traceability. The need for traceability has also extended to other industries, due to issues of product quality, safety and security. In 2005, the European Commission implemented several directives and regulations on food safety, which increased the focus on traceability in agricultural commodities. These food law guidelines address “traceability of food and feed products, responsibility of operators, withdrawal of unsafe food or feed from the market and notification to the competent Authorities”.

Beyond food safety, consumers, NGOs, governments, suppliers and buyers increasingly demand more information about the origins of their products and materials and the conditions under which they were produced and transported along the value chain. With the increase in demand for organic, fair trade and environmentally friendly products and materials, well-functioning traceability systems and new technologies have been developed to meet stakeholder needs.

Traceability is becoming more of an accepted practice, and one that companies increasingly embrace as part of their sustainability activities. The Forest Stewardship Council describes FSC certification as a “license to trade” for businesses. The most successful traceability schemes are multi-stakeholder, involving business, government, and other stakeholders and civil society organizations who have an interest in the sustainability of the said commodity [2].

Multi-stakeholder initiatives are complex and require careful governance to manage often very divergent points of view. Traceability schemes are proving able to bring – and keep – these players together. The focused purpose of making a specific commodity more sustainable is a powerful and uniting force for the participating companies and stakeholders.

The three models are Product Segregation, Mass Balance, and Book and Claim (see image below). They are differentiated by the extent to which certified and non-certified materials are permitted to mix, as well as by claims that can be attached to the final product.

Models with less stringent controls around the handling of certified and non-certified materials are less complex and thus less expensive. However, wherever possible, the type of certification and the model of traceability used should depend on the sustainability claims and the materials being traced rather than the cost of implementing the model. Product segregation is best suited and should be prioritized, when possible, if there is a risk of being involved in human rights or labor abuses when sourcing a certain commodity. The Mass Balance and Book and Claim models are open to criticism for commodities where Product Segregation is available.

As outlined in our steps above, companies should not feel pressured to participate in traceability schemes across every commodity they buy, but rather focus on those that are most material to the business based on assessments of sustainability risks and potential adverse impacts. It can be difficult to gain internal buy-in for developing a traceability programme, and it makes it much easier if the business case is clear, which relies largely on the level of risk and opportunity that a company has for leverage.

It is hoped that readers have enjoyed and gained value from the guide, and will be taking appropriate steps to engage with traceability in their companies and organizations. The stated objectives of the guide were to:

- provide an overview of the importance of traceability for sustainability purposes;
- highlight the global opportunities and challenges of traceability;

- outline practical steps of how to go about implementing traceability.

Companies that attempt traceability on their own will face immense hurdles and may actually impede the work being done on an industry level. This does not mean that companies must be willing to embrace and support collaborative initiatives, while mindful of their imperfections. However, the benefits outweigh the negatives: by getting involved in a global initiative, companies have a chance to shape and drive the initiative, and have the support of their peers and a trusted stakeholder as they develop their own related approaches.

The overwhelming consensus from the individuals interviewed for this guide is that traceability is here to stay, and will continue to increase in importance and impact. One of the most critical drivers of this trend is increased consumer demand to know more about the products they are buying – what is in them, where they come from, the conditions under which they were made, how they got to them, and even how they will be disposed of. Companies who invest in increased transparency, traceability and measurements of sustainability data along the value chain will have a competitive advantage in meeting this consumer demand.

It is possible to see a future where technology enables the full product and supply chain information that consumers expect, and traceability will be the norm. Tools already exist to enable people to use their smart phones to scan a barcode and learn more about a product from a sustainability perspective; it is easy to see this trend evolving as technology improves, and as the ability to collect, analyze and share data becomes easier and cheaper.

1. The importance of traceability in certification the quality of animal products. Iurchevici Lidia, 1 Chetroiu Rodica. Conference Paper. The importance of traceability in certification the quality of animal products. Version is available at: <http://hdl.handle.net/10419/111619>.
2. Fairtrade (2011), Windward Island Farmers' Association, <http://www.fairtrade.org.uk/producers/bananas/winfa>
3. A Guide to traceability. A Practical Approach to Advance Sustainability in Global Supply Chains. United Nations Global Compact.

УДК 535.3

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ

Савкова Е. Н., Миргород Ю. С., Матюш И.И.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В Республике Беларусь под эгидой немецкого концерна Siemens прошёл форум, посвящённый внедрению цифровой трансформации и использованию 3D-моделей в процессах разработки, производства и обслуживания объектов и систем

различной степени сложности [<http://siemens.by>]. На форуме обсуждались организационные аспекты реализации процессов и технологий для перехода к виртуальным испытаниям и предсказательному моделированию. Технологии

воксельной графики все шире используются не только для исследований физически реализованных объектов, но и на стадии их проектирования, что существенно повышает экономическую эффективность подготовки и отладки производственного процесса. Существует целый ряд публикаций отечественных и зарубежных авторов, а также ТНПА и документы в области технического нормирования и стандартизации, касающиеся, управления графическими данными и создания 3D образов. Однако в данных публикациях внимание сконцентрировано в основном на технических аспектах, связанных с обработкой сигналов и изображений и применении различных моделей для создания виртуальных образов: предфильтрация, дискретизация, квантование, кодирование, декодирование и постфильтрация. Метрологические аспекты в данной области не затрагиваются. Поскольку все эти операции предполагают потери информации, а, следовательно, влияют на результирующую разрешающую способность цифрового изображения, интерес представляет исследование источников потерь и установление целевой неопределенности результатов измерений.

**Научная идея.** Каждый физический объект для целей контроля и испытаний может быть описан конечным множеством свойств. Каждое свойство объекта оценивается по определенной шкале (номинальной, ранговой, интервальной, отношений, абсолютной). Совокупность свойств объекта может быть представлена в виде совокупности частично пересекающихся шкал, формирующих некое виртуальное функциональное пространство с базовыми элементами «ось», «градация», «телесный угол» и т.д. Современные 3D технологии предоставляют широкие возможности в моделировании, построении и исследовании таких пространств. И таким образом, метрологическое сопровождение 3D технологий в предсказательном моделировании объектов заключается в применении превентивного принципа метрологической прослеживаемости путем управления допусками, приписанными значениями и целевыми неопределенностями, создании виртуальных мер и опорных пространств (хранящихся в виде файловых данных) на основе физически реализованных основ для сравнения (эталонных и референтных методик).

**Прикладной аспект.** Объемные данные представляют набор отсчетов  $S(x, y, z, v)$ , в которых параметр  $v$  является количественным свойством объекта в 3D-пространстве  $(x, y, z)$  - интенсивностью, либо набором свойств в векторном пространстве. Массив  $S$  определяет значения  $v$  свойства объекта в дискретных точках пространства. Функция  $f(x, y, z)$  может быть определена на объеме для того, чтобы описать значения величин в любой точке пространства. Функция  $f(x, y, z) = S(x, y, z)$  только если

координата  $(x, y, z)$  совпадает с точкой сетки, в противном случае значение аппроксимируется путем применения интерполяционной функции к массиву данных  $S$ . Объем данных представляется массивом вокселей или массивом ячеек. Эти два подхода вытекают из необходимости повторного вычисления значения между точками сетки во время рендеринга. Для этих целей используются интерполяционные алгоритмы. Однако, так как функция объемного поля неизвестна, и неизвестно были ли взяты отсчеты с частотой раной или большей частоте Найквиста, невозможно с полной достоверностью утверждать в надёжности данных полученных между узлами сетки при помощи интерполяции.

Воксельный метод представления объемных данных приравнивает значение области вокруг точки сетки к значению самой точки. Таким образом воксел – это область неизменного значения величины, окружающая центральную точку сетки. Преимуществом данного метода заключается в том, что при генерации изображения используются только известные значения. Метод ячеек рассматривает объемные данные как совокупность гексаэдров, углы которых являются точками сетки и значение которых изменяется между точками сетки. Данный метод оценивает значения между точками сетки посредством интерполяции (трикубической или трилинейной). Изображения, созданные с использованием метода ячеек, выглядят более гладкими, однако их достоверность не может быть проверена. Следует принять во внимание, что применение общих интерполяционных техник достаточно для того, чтобы полученное изображение считалось действительным.

Анализ научных работ в области технологий 3D-моделирования показал, что в настоящее время широкое распространение получил воксельный метод представления объемных данных. Воксели могут представлять различные физические характеристики, такие как плотность, температуру, скорость, давление и др. Измерения, площади или объема могут быть произведены на основе вышеперечисленных наборов данных. Области применения объемной визуализации являются медицина (компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, УЗИ), биология (конфокальная микроскопия), геофизика (сейсмография при разведывании газовых и нефтяных месторождений), промышленность (моделирование конечных элементов), молекулярные системы (карты электронной плотности), метеорология (прогнозирование погоды), вычислительная гидродинамика (потoki жидкости), вычислительная химия (моделирование новых материалов), обработка цифровых сигналов и изображений (конструктивная сплошная геометрия).

Для работы с объёмными данными авторами предлагается использование системы компьютерной алгебры (CAS) Wolfram Mathematica, которая расширяет и оптимизирует возможности обработки и анализа 3D-объёмных данных. Wolfram Mathematica предоставляет широкую и глубокую встроенную поддержку как программой, так и интерактивной обработки объёмных данных в промышленном масштабе, полностью интегрированной с мощными математическими и алгоритмическими возможностями Wolfram Language. Основная обработка данных, включая вычисления статистических величин, сглаживание, тестирование и визуализацию, даёт первый уровень анализа. Программный продукт Wolfram Mathematica управляет 3D данными, формируя их при помощи методов семплирования в разных дисциплинах. Объёмные данные, получаемые от биомедицинских сканеров обычно поступают в виде 2D-слоёв в декартовой системе координат. Выходными данными симуляций суперкомпьютеров и метода конечных элементов являются неструктурированные сетки. Необработанные данные ультразвуковых сканеров представляют собой последовательность произвольно ориентированных веерообразных срезов, которые представляют собой частично структурированные точечные образцы. Последовательность 2D-слоев, полученных от этих сканеров, реконструируется в 3D-объёмную модель.

**Метрологический аспект.** Метрологическое сопровождение 3D технологий в предсказательном моделировании основывается на разработке метрологических моделей объектов, позволяющими управлять допусками на параметры и целевыми неопределенностями. Технологии обработки графических данных позволяют использовать цифровые изображения как виртуальные модели реальных объектов при их моделировании и исследовании, существенно повышая их экономическую эффективность и информативность. Однако существует ряд проблем, связанных с достоверностью и надежностью результатов моделирования и исследований, которые требуют решений.

1. Технологии обработки цифровых изображений основаны на принципах статистической

избыточности и предполагают применение разнообразных алгоритмов сжатия, в результате чего часть информации о характеристиках объекта безвозвратно теряется. Поэтому необходимо выполнить анализ и корректный выбор таких алгоритмов, основываясь на принципе необходимости и достаточности. 2. В графических редакторах для измерений геометрических, фотометрических и колориметрических параметров используются встроенные ранговые шкалы свойств «плавающими» пределами обнаружения и диапазонами. Следовательно, необходима методология разработки условных шкал, обеспечивающих метрологическую прослеживаемость к единицам SI (и другим единицам) и доказательную основу результатов измерений. 3. В современных условиях процессы исследований свойств виртуальных и физически реализованных объектов рассматриваются в едином контексте – с позиций моделирования и оптимизации параметров. Поэтому оценивание точности измерений является компромиссом между получением измерительной информацией, ее потерями и затратами ресурсов. Вследствие этого оценивание неопределенности результата измерения представляет собой интерактивный процесс непрерывного отслеживания количественных свойств объекта измерения и их соответствия установленным требованиям.

В предсказательном моделировании будут разработаны превентивные метрологические модели свойств объектов – модели математических ожиданий (приписанных значений) и модели рассеяния (целевых неопределенностей) результатов измерений, позволяющие осуществлять виртуальное моделирование объектов и их свойств, повышая экономическую эффективность подготовки и организации производства продукции. Практическая значимость запланированных результатов заключается в том, что разработанные методы и подходы будут положены в основу разработки и развития методов контроля продукции и процессов, в том числе технологических, используемых на производстве для определения соответствия из параметров установленным требованиям.

УДК 004.744.6:006

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА СОЗДАНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И УЛУЧШЕНИЯ СМК ОРГАНИЗАЦИИ

**Серенков П.С., Бояровская К.И.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Идея первичности «процессного подхода» при создании успешной компании или ее системы менеджмента не нова. «Процессный подход» является фундаментом инженерного подхода к организационному проектированию сложных

систем управления [1]. Основы процессного подхода в теории и практике организационного развития были предложены еще классиками научного менеджмента Ф. Тейлором, А. Файолем [2]. Аналогично Э. Деминг рассматривает систему

управления как последовательность функций или видов деятельности (процессов) внутри организации, которая работает совместно на цель организации [3]. Кроме того, подход как концепция давно применяется в методологии структурного анализа и проектировании систем SADT, при реинжиниринге бизнес-процессов [4].

Анализ существующих литературных источников показал, что сложилась отличная от классической устойчивая точка зрения в отношении сущности процессного подхода, решаемых им задач, практической реализации, потенциала развития. Процессный подход в сложившейся интерпретации представляется как альтернатива так называемому функциональному, а в паре они рассматриваются два основных подхода к созданию систем менеджмента и, в частности, СМК. Причем функциональный подход, характеризуется в отличие от процессного как прагматичный, приземленный к реалиям функционирования организации и рассматривается как основной инструмент оперативного управления. Процессный подход в сложившейся интерпретации характеризуется как правильный, но идеалистичный по причине невозможности практической реализации и обречен на статус подхода, применяемого с целью демонстрации соответствия СМК требованиям СТБ ISO 9001.

Существует множество попыток противопоставить оба сложившихся подхода, определить и классифицировать достоинства и недостатки [5, 6].

На наш взгляд, ключевым моментом существующих противопоставлений подходов является следующее. Система менеджмента, организованная на принципах процессного подхода, нацелена непосредственно на достижение целей. Функционально организованная система менеджмента нацелена на решение задач (отдельных функций), т.е. достижение целей происходит опосредованно.

Отсюда вытекает комплекс потенциальных преимуществ процессного подхода в части достижения стратегических целей организации: видение владельцем бизнес-процесса конечных целей позволяет оптимизировать распределение ресурсов между подпроцессами, наладить рациональную систему взаимодействия и взаимосвязей, ответственности и полномочий, выстроить эффективную систему сбора и анализа данных, обеспечить гибкую управляемость результативностью подпроцессов с позиции качества конечной продукции как систему обратных связей.

Функциональный подход в существующей интерпретации в части достижения стратегических целей организации потенциально не обладает возможностями процессного подхода. Очевидно, что в основе обозначенной коллизии лежит некорректная классификация подходов. У процессного и функционального

подходов в существующей интерпретации различные классификационные основания.

Функциональный подход начинается с организационной структуры. Организационная структура как первооснова функционального подхода – это своеобразная материализованная форма организации труда, которая хорошо отработана на практике и психологически комфортна как для управленцев, так и для работников. Первоосновой (классификационным основанием) процессного подхода выступает структура сети процессов системы менеджмента, а точнее ее соответствие конечным целям организации. Проблема в том, что форма организации труда в рамках процессного подхода в существующей интерпретации отсутствует. Поэтому и возникло мнение, что процессный подход является идеалистичным по причине невозможности практической реализации.

Противопоставление процессного и функционального подхода в такой интерпретации очевидно является некорректным [4]. Во-первых, потому, что функции, выполняемые структурными подразделениями, так же, как и сквозные процессы, являются равнозначными объектами управленческой деятельности. Функции – части («отрезки») процесса. Поэтому между ними всегда существует отношение «часть – целое» со всеми вытекающими из этого следствиями.

Во-вторых, результатом как функционального, так и процессного подходов является, в конечном счете, обеспечение характеристик конечной продукции, только разными системами организации работ. Принцип функциональной взаимозаменяемости никто не отменял: результативность сквозного процесса – есть зависимость определенного вида от результативностей функций, выполняемых структурными подразделениями. Особенность только в исходной концепции проектирования системы менеджмента: функции структурных подразделений и их целевые показатели формируются на основе сквозных и внутренних процессов и их целевых показателей («нарезание их на отрезки»);

Напрашивается вывод, что функциональный и процессный подходы в существующей интерпретации суть различные представления одного и того же – деятельности организации по производству продукции и достижению удовлетворенности потребителя. Вопрос заключается в переопределении этих понятий с позиции классических представлений научного менеджмента и рациональном применении в рамках системы менеджмента.

Можно констатировать, что основной причиной недопонимания места и роли процессного подхода в менеджменте, неполной реализации его потенциальных возможностей, противопоставления функциональному подходу

является вольная трактовка этого понятия по отношению к исходному, заложенному еще в рамках классического научного менеджмента [7].

Чтобы ликвидировать вскрытые несоответствия в терминологии процессного подхода в рамках СМК, не ломая сложившуюся структуру терминов, введем следующую систему понятий:

- процессный подход, как первый этап системного подхода – будем называть комплексным процессным подходом;

- частная реализация первого этапа системного подхода как представление процесса в виде идентификации и взаимодействия функций и ресурсов, необходимых СМК – будем называть процессным подходом;

- частная реализация первого этапа системного подхода как представление процесса в виде ролевых функций в рамках СМК – будем называть функциональным подходом (или подходом к управлению через организационную структуру).

В такой интерпретации процессный и функциональный подходы суть части единого целого - комплексного процессного подхода. Их нельзя противопоставлять друг другу. Каждый из них определяет процесс под определенным углом зрения с помощью специфической формы представления процессов.

Вопрос лишь в том, когда и в каких случаях применять то или иное представление процесса. На наш взгляд, наиболее характерным и практически востребованным направлением классификации ситуаций применения является жизненный цикл СМК, представленный тремя основными этапами:

1 этап - создание системы;

2 этап - рутинное функционирование системы и поддержание ее в рабочем состоянии;

3 этап - анализ и совершенствование системы.

Очевидно, что процессный подход рационально использовать в ходе реализации 1 и 3 этапов жизненного цикла СМК. Действительно, прежде всего, организации должны определить

свои системы и входящие в них процессы для того, чтобы можно было четко понимать, управлять и улучшать эти системы и процессы.

Функциональный подход удобен для оперативного управления организацией. т.е. эффективен именно на 2 этапе жизненного цикла СМК. Определяется это тем, что организационная структура, как специфическая форма представления процессов с позиций ролевых функций (ответственности, полномочий, взаимоотношений, обязанностей) – наиболее естественный (привычный) инструмент управления.

В результате анализа теоретических наработок, практики применения системного подхода к формированию, поддержанию в рабочем состоянии и совершенствованию СМК нами установлены соответствия реализаций комплексного процессного подхода этапам жизненного цикла СМК, что открывает новые возможности создания, поддержания в рабочем состоянии и развития СМК организаций.

1. Сухов, С.В. Системный подход к управлению коммерческим предприятием / Менеджмент в России и за рубежом. – 2001. – № 6 [Электронный ресурс]. – 2001. – Режим доступа: <http://www.dis.ru>. – №
2. Тейлор, Ф.У. Принципы научного менеджмента / Ф.У. Тейлор; пер. с англ. А.И. Зака; под ред. и с пред. Е.А. Кочергина. – М.: Контроллинг, 1991. – Вып. 1. – 104 с.
3. Деминг, Э. Выход из кризиса: учебник / Э. Деминг. – Тверь: Альба, 1994. – 497с.
4. Серенков П.С., Курьян А.Г., Волонтей В.П. Методы менеджмента качества. Процессный подход. – научн. издание. – Минск: Новое знание; М.:ИНФРА-М, 2013. – 441 с
5. Панина О.А. Проблемы и особенности процессного подхода к управлению предприятием.
6. Репин, В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В.В. Репин, В.Г. Елиферов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
7. Оптнер С. Л. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. – М.: Советское радио, 1969.

УДК 621.791

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Серенков П.С., Лесин А.С.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Широкое признание концепции неопределенности в прикладной метрологии инициировало развитие новых наукоемких подходов, методов и средств по достижению максимальной эффективности измерений, например, по критерию «точность / трудоемкость» при заданной степени доверия. Особое внимание уделяется методике

оценки суммарной неопределенности результата измерений.

Практикой применения концепции неопределенности в отношении подходов и методов сформулировано правило разумной достаточности: «цель определяет средства ее достижения». Т.е. методы и средства планирования и реализации

измерений должны отвечать требованиям пользователя. Данный факт предоставляет измерительным лабораториям широкие возможности выбора методов, повышающих эффективность измерений.

До недавнего времени основным (единственным) методом корректного оценивания неопределенности результатов измерений считался так называемый «модельный подход», изложенный в известном руководстве по выражению неопределенности измерений (GUM) [1].

Теория и практика его применения сегодня позволяет утверждать, что достоверность подхода на самом деле не гарантирована по целому ряду причин [2, 3].

В аналитических отчетах ряда международных организаций по метрологии в последние годы сделан акцент на использование «эмпирических подходов» при оценке неопределенности результата измерения как альтернативы строгому математическому моделированию [2].

Основной довод в пользу «эмпирических подходов» - значительное повышение эффективности исследования процесса измерения. В основе «эмпирических подходов» лежит достаточно тривиальная идея: полные оценки неопределенности можно получить попутно с выполнением процедур, обязательных для аккредитованной лаборатории, например, валидации методики измерений методом внутрилабораторных или межлабораторных исследований характеристик точности метода, контроля его качества посредством участия лаборатории в программах проверки квалификации (РТ) и др. [2].

В докладе приведены доказательства, что оба подхода, несмотря на различия, суть равноценные по достоверности пути исследования процесса измерений с точки зрения оценивания суммарной неопределенности результата.

Как правило, процесс измерений физической величины состоит из ряда параллельно - последовательных операций (рис. 1).

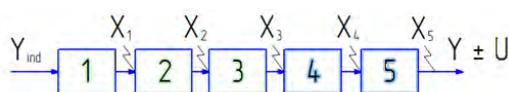


Рисунок 1 – Процесс измерения физической величины как последовательность операций

Предположим, каждая операция является источником одной входной величины, влияющей на результат измерений  $Y$ . Т.е. влияющие факторы -  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ . Очевидно, что математически корректным является следующее выражение:

$$U_c(Y) = \sqrt{\left[ \frac{(c_1 \cdot u_1)^2 + (c_2 \cdot u_2)^2}{(c_3 \cdot u_3)^2} \right] + \sqrt{[(c_4 \cdot u_4)^2 + (c_5 \cdot u_5)^2]}.}$$

Такое представление можно объяснить для некоторого конкретного случая следующим образом (рис. 2).

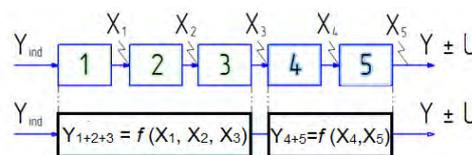


Рисунок 2 – Процесс измерения физической величины как последовательность сгруппированных операций

Результат первых трех операций (1+2+3) описывается некой функциональной зависимостью. Определена промежуточная суммарная оценка неопределенности на данном «отрезке» процесса –  $U_{1+2+3}$ . Оценка произведена, например, модельным подходом.

4-й и 5-й этапы функциональной зависимости не имеют. Промежуточная суммарная оценка неопределенности на данном «отрезке» процесса –  $U_{4+5}$ . Оценка произведена, например, эмпирическим подходом.

Результат оценивания суммарной неопределенности результата измерений имеет вид:

$$U_c(Y) = \sqrt{u_{1+2+3}^2} + \sqrt{u_{4+5}^2}.$$

Идею комбинированного подхода таким образом можно «технически» сформулировать следующим образом. В процессе оценивания неопределенности результата процесс измерения можно условно делить на «отрезки», каждый из которых можно рассматривать как самостоятельный дочерний подпроцесс. Для оценки суммарной неопределенности результата каждого подпроцесса можно применить модельный или эмпирический подход. Оценка суммарной неопределенности результата всего процесса измерений  $u_c(Y)$  производится путем комплексирования оценок суммарной неопределенности результатов всех подпроцессов («отрезков») по «закону распространения неопределенностей» GUM [3].

С практической точки зрения интерес представляют два основных случая применения комбинированного подхода:

- прямые измерения
- косвенные измерения.

Случай 1. Прямые измерения. Использование комбинированного подхода для случая прямых измерений в большинстве случаев нерационально. Исключения составляют измерения, включающие множество последовательных операций, например, в области аналитической химии.

Неопределенность результатов прямых измерений может быть оценена либо модельным, либо эмпирическим подходами.

Как правило, модель прямого измерения принимают в виде

$$Y = Y_{ind} + C_1 + C_2 + \dots + C_N,$$

где  $Y_{ind}$  – показание средства измерений,  $C_i$  – поправки (входные влияющие величины).

Очевидно, что модель измерений в таком виде не отражает физическую взаимосвязь входных величин с результатом измерений, т.е. является не строго корректной. Поэтому модельный подход, основанный на некорректной модели измерений, очевидно, будет давать искаженные оценки неопределенности результата измерений. Можно утверждать, что эмпирический подход в этой части является более «честным». В соответствии с ним, взаимосвязи устанавливаются по результатам измерительного эксперимента и поэтому имеют более объективный характер. Однако для прямых измерений модельный подход применяют достаточно часто, так как он менее затратный, а некорректность вида аддитивной модели измерений компенсируется устоявшимися взглядами на процесс измерений.

Случай 2. Косвенные измерения. Это как раз тот случай, когда для оценки неопределенности результатов измерений рационально применить комбинированный подход.

Алгоритм применения комбинированного подхода рассмотрен на примере определения плотности нефтепродуктов.

Задача оценивания неопределенности результата косвенных измерений имеет иерархический характер. На первом уровне иерархии рационально применить модельный подход. Формируется и анализируется модель косвенного измерения.

Второй уровень решения задачи оценивания неопределенности результата косвенных измерений предполагает параллельное решение самостоятельных задач оценивания неопределенностей результатов прямых измерений, входящих в состав косвенного.

Для их решения рационально применение эмпирического подхода. Результаты измеритель-

ного эксперимента обрабатываются с использованием метода дисперсионного анализа (возможно применение программного пакета STATISTICA).

Анализ полученных результатов: если остаточная ошибка меньше лабораторной составляющей неопределенности результата прямого измерения, то принятая статистическая модель измерений адекватна, оценка неопределенности результатов прямых измерений корректна, дальнейшие исследования нецелесообразны.

В противном случае модель измерений считается неадекватной. Т.е. статистическая модель прямого измерения включает не все влияющие факторы. Модель необходимо пересмотреть с учетом выявленных новых влияющих факторов. Для этих целей необходимо организовать второй углубленный этап исследований [4]. В качестве наиболее рациональных способов выявления всех факторов, влияющих на процесс измерений, можно рекомендовать экспертные методы построения причинно-следственных диаграмм по схемам SWIPE, PISMOEA [4].

После того, как получены надежные оценки неопределенности результатов прямых измерений, входящих в состав косвенного измерения, следует вернуться на первый уровень иерархии решения задачи и расчетным путем оценить неопределенность результата косвенного измерения.

1. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
2. EUROLAB Technical Report No. 1/2002: Measurement Uncertainty in Testing EUROLAB 2002 ([www.eurolab.org](http://www.eurolab.org)).
3. Комбинированный подход к оценке неопределенности результата измерений в рамках внутрिलाбораторного исследования МВИ/ П.С.Серенков [и др.] // Метрология и приборостроение. – Минск, 2013. – № 3. – С. 15-23.
4. ISO/TS 21748, Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation.

УДК 621.791

## КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Серенков П.С., Сацукевич А.А., Иванова Н.Н.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Инновационные проекты по разработке и внедрению новых материалов, технологий, изделий авто-, тракторо-, станкостроения, инструментальной промышленности, в том числе проекта по созданию адаптивных материалов и покрытий, являются, как правило, ресурсозатратными и реализуются, как известно,

пэтапно. Каждый последующий этап исследований и внедрений зависит от результатов испытаний, проведенных на предыдущем этапе. Очевидна проблема повышения эффективности испытаний механических и триботехнических свойств материалов и покрытий:

- с одной стороны, требуется достаточно высокий уровень доверия к результатам, позволяющей минимизировать риски некорректных решений в процессе исследования, анализа и прогнозирования свойств материалов и покрытий,

- с другой стороны, большое количество испытаний ставит задачу минимизации затрат на их проведение.

Значительные расходы временных, финансовых и материальных – технических ресурсов снижают ценность результатов и возможности бюджета организации по проведению полноценного комплекса исследований свойств разрабатываемых материалов или покрытий. Организация – разработчик вынуждена сворачивать комплексные испытания и принимать решения на основании неполного массива информации. Естественно возникает риск принятия некорректных решений.

Решить данную проблему возможно путем организации предварительной стадии экспресс – анализа, реализуемой методами экспертного оценивания. Способ реализации – экспертная система, позволяющая определять ориентировочный уровень стойкости покрытий образцов и значительно (в разы) сократить техническую, наиболее затратную часть испытаний (количество циклов испытаний, оборудование, условия и т.п.). Отметим, что при этом появляется возможность значительно повысить уровень доверия к результатам испытаний, например, путем увеличения количества испытаний за счет высвобождающегося резерва ресурсов.

С учетом вышесказанного можно утверждать, что разработка методологии экспертного оценивания механических и триботехнических свойств материалов и покрытий как предварительной стадии экспресс – анализа в рамках технических испытаний новых материалов и покрытий, являются актуальной и востребованной в Республике Беларусь.

Экспертные оценки – это качественные или количественные данные, основанные на информации неколичественного характера, которые могут быть получены только с помощью специалистов – экспертов.

Главным недостатком информации, получаемой экспертным путем, является ее субъективность. Различают два основных направления исследований в этой области: 1) исследования с целью создания новых методов оценивания, 2) исследования по оцениванию достоверности результатов оценивания.

Первое направление исследований. Традиционно с методами экспертного оценивания связывают научное направление – квалиметрию [1, 2]. Характерный для нее способ

повышения объективности оценки – сопоставление мнений группы экспертов. Тем не менее, даже при правильной организации групповой опрос экспертов имеет ряд недостатков. Подробно проблемы группового выбора рассмотрены в подходах и методах классической квалиметрии [1,2].

В психофизиологических исследованиях исторически сложились два принципиально различных подхода к экспертным оценкам, которые условно можно назвать объективным и субъективным.

Субъективный подход к экспертному оцениванию моделирует поведение человека принимающего решения, и возникающие в результате этого риски. Этот подход и соответствующие методы оценивания тесно связан с математической психологией. Впервые субъективный подход изложен в работах Г. Крамера и Д. Бернулли [3].

Объективный подход моделирует и решает задачу оценивания исходя из объективной модели предпочтений человека и принимаемых им решений. Реализацией данного подхода выступает теория ожидаемой полезности фон Неймана — Моргенштерна [4], применимая для случайных событий. В рамках теории применяется аксиоматический подход, который гарантирует квантификацию предпочтений, что, собственно, и позволяет построить функцию полезности. Противниками теории полезности выступают Д. Канеман и А. Тверски [5], Лумс и Сагден [6] и др.

Отдельным вопросом стоит оценивание достоверности результатов экспертного оценивания. Попытки количественно оценивать, анализировать и управлять точностью результатов экспертных оценок, используя подходы, используемые в метрологии, предпринимаются на регулярной основе [7, 8]. Венцом такого рода попыток можно считать результаты изысканий, изложенные в работе [9]. Авторы замахнулись на создание системы метрологического обеспечения экспертных измерений (МОЭИ), как полного аналога СОЕИ. Ключевой момент системы – применение аппарата теории вероятности и математической статистики, применяемого в классической метрологии, для оценки, анализа и сравнения методов экспертного оценивания.

Однако безусловное, «слепое» применение используемого в классической метрологии аппарата теории вероятности и математической статистики для оценивания достоверности экспертных оценок может привести к нарушению классических принципов и правил анализа и обработки данных, а, следовательно, к непредсказуемому снижению достоверности результатов экспертного оценивания.

Можно сделать выводы:

1. Существующие современные подходы и методы экспертного оценивания касаются главным образом психофизиологических исследований. В технической области до сих пор используются методы квалиметрии, которые сегодня уже не обеспечивают необходимого уровня достоверности.

2. Достоверность экспертных оценок - комплексная, многоаспектная задача. Результаты экспертного оценивания подвержены серьезным вариациям, имеющим как случайный, так и систематический характер. При определенных условиях организации процесса экспертного оценивания для оценки достоверности результатов можно успешно применять методы статистического анализа, используемые для аналогичных целей в классической метрологии.

Очевидна необходимость решения научно-технической проблемы повышения эффективности испытаний механических и триботехнических свойств материалов и покрытий (обеспечения необходимого уровня доверия к результатам при минимальных затратах) путем организации предварительной стадии экспресс – анализа, реализуемой методами экспертного оценивания, позволяющей минимизировать риски некорректных решений в процессе исследования, анализа и прогнозирования свойств.

В докладе приведено научное обоснование проблемы повышения эффективности испытаний механических и триботехнических свойств материалов и покрытий. Обоснована модель испытаний, отличающаяся наличием предварительной стадии экспресс – анализа, реализуемой методами экспертного оценивания. Особенность реализации модели – системный подход, предполагающий формирование системы

экспертного оценивания механических и триботехнических свойств материалов и покрытий как совокупности процессов планирования показателей оценки, обоснования методов, формирования процедуры оценивания, обработки результатов оценивания. На основе системной классификация источников потерь достоверности предложена методика формирования комплекса методов экспертного оценивания, обеспечивающая возможность рационального выбора в каждом конкретном случае.

1. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П.. О квалиметрии. – М.: Издательство стандартов, 1972. – С. 1–172.
2. Орлов А.И.. Организационно-экономическое моделирование: учебник в 3-х ч./ А.И. Орлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2009.
3. Фишберн, П. С. Теория полезности для принятия решений / П. С. Фишберн. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
4. Нейман, Дж. фон. Теория игр и экономическое поведение / Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн. – М. : Наука, 1970. – 707 с.
5. Kahneman, D. Prospect Theory: An analysis of Decision under Risk / D. Kahneman, A. Tversky // *Econometrica*. – 1979. – No. 47. – P. 263–291.
6. Loomes, G., Sugden, R. Regret Theory: An Alternative Theory of Rational Choice under Uncertainty / G. Loomes, R. Sugden // *Economic Journal*. – 1982. – No. 92. – P. 805–824.
7. Бурков Е.А., Евграфов В.Г., Падерно П.И. Критерий согласованности парных сравнений // *Информационно-управляющие системы*. – 2011. – No. 3. – С. 57–60.
8. Портнова И. М. Совершенствование системы оценивания качества продукции : Дис. канд. техн. наук : 05.02.23 Пенза, 2005 206 с. РГБ ОД, 61:05-5/3015.
9. Хамханова Д.Н. Теоретические основы обеспечения единства экспертных измерений. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2006. – 170 с.

УДК 621.791

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В ПЛАНИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Серенков П.С.<sup>1</sup>, Романчак В.М.<sup>1</sup>, Сацукевич А.А.<sup>1</sup>, Басинюк В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Наибольший удельный вес в себестоимости инновационной продукции (конструкций, материалов, технологий) при ее создании и внедрении, как правило, имеют комплексные исследования с целью получения рациональных конструктивных, технологических, эксплуатационных и др. характеристик. Исследования осуществляются, как правило, экспериментальным путем, методами планирования эксперимента, которым свойственно «проклятие размерности» – большое количество экспериментов при большом количестве

факторов. А это требует значительных расходов временных, финансовых и материально – технических ресурсов, что снижает ценность результатов и возможности бюджета организации по проведению полноценного комплекса исследований свойств разрабатываемой инновационной продукции. Разработчик вынужден сворачивать комплексные испытания и принимать решения на основании неполного массива информации. Естественно возникает риск принятия некорректных решений.

Теория планирования эксперимента для таких случаев предполагает стадию так называемого отсеивающего эксперимента. Обоснован метод проведения отсеивающего эксперимента, основанный на экспертных оценках, что существенно снижает затраты на эту стадию исследований.

Предложены два метода экспертного оценивания. Первый метод (метод покоординатного спуска), предполагает два этапа: формирование факторного пространства и определение экспертным путем степени влияния факторов на результат, а также их рациональных значений. Проблема метода заключается в том, что определение рациональных значений факторов в их неупорядоченной совокупности может вызвать риск не идентификации наилучшего результата.

В докладе обоснован второй, более трудоемкий, но при этом менее рискованный метод отсеивающего эксперимента, включающий следующие этапы:

- 1) предварительное изучение объекта исследований;
- 2) выявление влияющих факторов на объект исследования и упорядочение их;
- 3) определение диапазона возможных значений факторов;
- 4) поиск области последующих физических исследований – комплекса наиболее влияющих на результат факторов и их предполагаемых рациональных значений.

На первом этапе осуществляется определение групп влияющих факторов с целью выявления факторного пространства, состоящего из  $N$  факторов, при помощи опроса компетентных специалистов, принимающих участие в исследовании по разработке инновационного продукта. Несмотря на то, что разрабатываемый продукт является эксклюзивным, группа экспертов, участвующая в его создании, обладает некоторым объемом априорных знаний о нем, которые основываются на собственном опыте, изучении технической литературы и т.д. Результатом опроса является выявление максимально полной информации об объекте – набора влияющих факторов.

На втором этапе необходимо выделить из всего набора  $N$  факторов группу наиболее влияющих на ожидаемый результат. Для облегчения решения данной задачи предложено классифицировать все  $N$  выявленные факторы в соответствии с методологией моделирования IDEF0 и процессным подходом по категориям: «Входы», «Выходы», «Механизмы», «Управление» (рисунок 1).

Необходимо определить вид целевой функции разрабатываемого продукта (норму требуемого свойства), используя подход Г.Тагути, например, «наилучший результат – середина поля допуска»

или «чем меньше, тем лучше», или «чем больше, тем лучше».



Рисунок 1 – Процесс разработки инновационного продукта в нотации IDEF0

Далее в соответствии с предлагаемой методикой необходимо осуществить ранжирование факторов двумя подходами для целей взаимной перепроверки:

- 1) ранжирование всего диапазона выявленных  $N$  факторов.
- 2) ранжирование факторов по каждой из категорий: «Входы», «Выходы», «Механизмы», «Управление» (рисунок 1).

Сущность метода априорного ранжирования факторов заключается в том, что факторы, которые согласно априорной информации могут иметь существенное влияние, ранжируются в порядке убывания вносимого ими вклада. Вклад каждого фактора оценивается по величине ранга, который отведен исследователем данному фактору при ранжировании всех факторов с учетом их предполагаемого влияния на целевую функцию. Экспертам предлагается расставить факторы по убыванию их значимости на характеристики получаемого инновационного продукта.

На третьем этапе следует определить границы рационального варьирования выявленных факторов на основании опроса группы экспертов.

Для реализации четвертого (основного) этапа нами разработан алгоритм, заключающийся в следующем. Для начала необходимо выбрать из ранжированного ряда факторов три наиболее влияющих фактора, по одному из каждой категории (см. рис. 1).

Реализуем первый тур эксперимента. Формируем структуру плана эксперимента по аналогии с полнофакторным планом эксперимента типа  $2^3$ . Эксперимент проводится путем опроса экспертов с использованием методов альтернатив и покоординатного спуска [2]. Отличительной особенностью данной процедуры является структура задаваемых экспертам вопросов: «на сколько продукт с характеристиками в  $i$ -й точке плана лучше (хуже) по целевой функции, чем во  $(i+1)$ -й точке».

Преимущество процедуры заключается в том, что при каждом опросе эксперт сравнивает продукт только по изменению одного из трех

факторов, остальные два остаются фиксированными. Дополнительно предполагается, что все остальные влияющие факторы также зафиксированы на принятых априори уровнях.

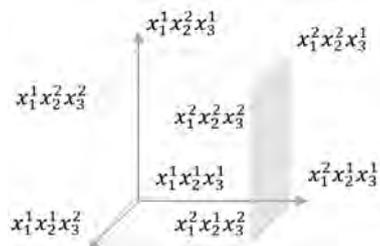


Рисунок 2 – Первый тур эксперимента («куб» трех наиболее влияющих факторов)

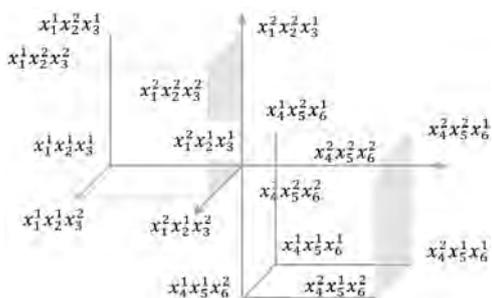


Рисунок 3 – Второй тур эксперимента («куб» вторых по рангам влияющих факторов)

В случае, если исследователь не знает, ответа на вопрос, можно «подойти» к данной точке плана по ребрам «куба» плана эксперимента другим путем. В этом и состоит главное преимущество данного метода. Если

исследователь и в этом случае не знает, что произойдет с выходной величиной в данной точке, то в ней необходимо поставить физический эксперимент. Графически данный подход представлен на рисунке 2.

В результате первого тура определяется точка плана, которой соответствует продукция, три главные характеристики которой дают наилучшее значение целевой функции.

Затем к данной точке с фиксированными значениями уровней факторов необходимо пристроить следующий «куб», характеризующийся набором вторых по рангу 3-х факторов, (рисунок 3). С этого момента начинается 2-й тур эксперимента, реализуемый по аналогии с 1-м.

Результатом второго тура будет точка плана, которой соответствует продукция, шесть основных характеристик которой

Далее по аналогии планируются и реализуются последующие туры эксперимента по всем остальным влияющим факторам. Конечный результат отсеивающего эксперимента - область дальнейших физических исследований, как совокупность влияющих факторов и их рациональных значений.

1. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента//Екатеренбург, 2004 – С. 195-208
2. Серенков П.С., Гуревич В.Л., Романчук В.М., Янушкевич А.В. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации. – Минск, 2012 – 244 с.

УДК658.562.012.7

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Соколовский С.С., Малиновская С.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В октябре 2016 года вступил в силу новый международный стандарт на системы менеджмента качества организаций, относящихся к автомобильной промышленности — IATF 16949. Цель стандарта не изменилась, по-прежнему основное внимания уделяется постоянному улучшению с акцентом на предупреждении дефектов и уменьшении вариаций и потерь по всем цепочкам поставок.

Стандарт IATF 16949 в отличие от ISO/TS 16949 не может рассматриваться как самостоятельный документ, а является дополнением к стандарту ISO 9001:2015 и основывается на его структуре. Следовательно, организациям, работавшим исключительно по ISO/TS 16949, предстоит осмысление и

реализация дополнительных изменений в последней версии стандарта ISO 9001. Необходимо определить контекст организации, потребности и ожидания заинтересованных сторон и задать область применения СМК. Если организация не несет ответственности за проектирование и разработку, стандарт предусматривает возможность не описывать требования к проектированию продукции.

В IATF 16949 расширилась возможная область применения стандарта, помимо серийно изготавливаемых узлов, компонентов и др. элементов в новой версии стандарта область применения также включает в себя аксессуары для автотранспортной техники.

Особое внимание уделяется требованию

соответствия всех продуктов и процессов, включая компоненты для сервиса, продукты поставщиков и внешних процессов, всем применимым законодательным и нормативным правовым требованиям, а также бескомпромиссное обеспечение безопасности продукции. В первую очередь это следует связывать с постоянно ужесточающимися законодательными требованиями во многих странах.

Возможным является создание и поддержание системы менеджмента безопасности продукции (данное требование не является обязательным в стандарте IATF, в отличие от требований, предъявляемых некоторыми европейскими организациями).

Для поддержки менеджмента внутренних и внешних рисков в стандарте приведены развернутые требования к соответствующим документированным планам действий в нештатных ситуациях, включая периодическую проверку их выполнения, рассмотрение результатов выполнения высшим руководством и уведомление об этом заинтересованных сторон.

С обеспечением безопасности транспортных средств тесно связано требование к наличию специальных процессов анализа автомобильных компонентов, возвращенных по гарантии. С целью оперативного выявления и локализации продукции, несоответствующей по качеству и/или безопасности установленным требованиям, в IATF 16949 приведены подробные требования к планам по прослеживаемости согласно нормам регулирующих ведомств и потребителя. Уменьшение риска попадания потребителю продукции «неправильной с первого раза» становится возможным благодаря реализации новых детальных условий, касающихся документированного управления несоответствующей, подозрительной, доработанной и отремонтированной продукцией.

Особое внимание в IATF 16949 уделено вопросам аудита системы менеджмента качества. В первую очередь до высшего руководства должна доводиться информация о результативности программы аудитов. Расширены и требования к аудиторам: они должны знать основные методики, предусматриваемые стандартом (такие как SPC, MSA, FMEA и другие), быть компетентными, владеть риск-ориентированным мышлением. Данный стандарт основывается на следующем.

Перспективное планирование качества продукции (APQP) является методикой планирования, разработки, подготовки производства и производства автомобильного компонента с акцентом на предупреждение ошибок, постоянное улучшение и совершенствование продукции, которая должна соответствовать требованиям потребителя и предвосхищать их.

Процесс одобрения производства компонента (PPAP) устанавливает общие требования к одобрению производства автомобильных компонентов, включая как производство, так и нештучные материалы.

Анализ видов и последствий потенциальных отказов (FMEA) – это эффективный инструмент повышения качества разрабатываемых технических объектов, направленный на предотвращение дефектов или снижение негативных последствий от них.

Анализ измерительных систем (MSA) призван дать заключение относительно приемлемости используемой измерительной системы через количественное выражение точности результатов измерений, их сходимости и стабильности.

Статистическое управление процессами (SPC) – это метод мониторинга производственного процесса с целью управления качеством продукции «непосредственно в процессе производства» вместо проведения контрольных проверок для обнаружения уже случившихся проблем.

Организациям необходимо поддерживать квалификацию аудиторов на должном уровне.

В стандарте описаны дополнительные требования к менеджменту изменений, такие как документирование процесса управления изменениями и реагирования на изменения, которые влияют на создание продукта, пробный прогон серийного производства для валидации влияния любых изменений на процесс изготовления и уведомления потребителя о любых запланированных изменениях. При временном изменении мер по управлению процессом производства, например, при использовании альтернативных методов контроля продукции в течение ремонта автоматического контрольного оборудования, IATF 16949 предписывает осуществлять документированное управление такими методами, включая, как минимум, ежедневное рассмотрение их действенности и анализ рисков.

С учетом научно-технического прогресса в автомобилестроении, стандарт IATF 16949 содержит ряд конкретных требований к менеджменту качества программного обеспечения и продуктам со встроенным программным обеспечением для автотранспортных средств при разработке (включая изменения и валидацию), его оценке и анализе отказов.

Роль высшего руководства в менеджменте качества стандартом увеличена за счет необходимости учета требований заинтересованных сторон при установлении целей в области качества, определении владельцев процессов, расширения информации, предоставляемой для принятия решений и последующих действий по различным аспектам системы,

включая процесс проектирования и разработки и оценку выполнимости производства.

Дополнительные требования установлены в IATF 16949 к источникам данных об удовлетворенности потребителей, менеджменту специальных характеристик, анализу осуществимости устойчивого производства продукции в заданных объемах, входным и выходным данным проектирования и разработки продуктов и технологических процессов, планированию предприятия, производственных помещений и оборудования, плану управления, верификации настроек, составлению графиков производства.

Для описания системы менеджмента качества требуется ряд новых документированных процессов, например, процесс проектирования и разработки продуктов и технологических процессов, процесс выбора поставщиков и процесс по идентификации мер по управлению внешними процессами, а также документированное описание учета специфических требований потребителей в системе менеджмента качества.

В части постоянного улучшения от организаций, работающих в сфере автомобильной промышленности, требуется применять документированный процесс определения использования соответствующих методологий

защиты от ошибок, включая испытания устройств по защите от ошибок на отказ калиброванными/поверенными тестовыми инструментами и соответствующие планы реагирования на возможные несоответствия.

Стандарт содержит в себе ряд новых терминов и определений, ссылки на ранее не упоминавшиеся и, следовательно, недостаточно используемые методы менеджмента качества, такие как DFSS, DFMA и другие, а также указания на национальные стандарты ассоциаций автомобильной промышленности – членов IATF для содействия в понимании и выполнении требований потребителей.

Следует отметить, что IATF 16949 привносит риск-ориентированный подход в процессы по всей организации так же, как и стандарт ISO 9001. По-прежнему стандарт на системы менеджмента качества организаций в автомобильной промышленности представляет собой тесно связанные друг с другом требования, подкрепленные перекрестными ссылками, и, следовательно, подходить к их реализации необходимо не отдельно и независимо, а при применении процессного подхода, используя накопленный опыт, прежде всего понимая смысл каждого положения стандарта и извлекая реальную пользу от выполненных действий.

УДК 658.562

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СМК ОАО «2566 ЗРРЭВ»

Спесивцева Ю.Б., Боровисюк Т.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Целью работы является совершенствование системы менеджмента качества ОАО «2566 завод по ремонту радиоэлектронного вооружения», реализация принципа постоянного улучшения путем разработки методики самооценки СМК.

По данным отчетов степень результативности системы за 2015 год составила 85,4 %, за 2016 год – 89,5 %. СМК организации результативна, но несмотря на это уровень заказов сократился. Руководство приняло решение провести процедуру самооценки для выяснения степени удовлетворенности Заказчика и персонала и на этой основе определить приоритетные направления для улучшения.

Проанализировав существующие методы и методики проведения самооценки, позволяющие выявить положительные и отрицательные стороны деятельности организации и осуществить сбалансированную оценку ситуации выбраны метод опросного листа и метод рабочей встречи. В связи со спецификой организации для проведения самооценки принято решение разработать комбинированную методику. За основу взяты критерии модели Европейского фонда управления качеством EFQM, позволяющие определить в какой

точке на пути к совершенству находится организация и бизнес-модель самооценки Тито-Конти, которая предназначена для оценки деятельности организации, планирования необходимых улучшений в соответствии с возможностями, использования полученных результатов в процессах стратегического и оперативного планирования.

Основные этапы самооценки:

1. Формирование экспертной и рабочей групп, распределение обязанностей. Используется метод «снежного кома», процесс выбора кандидатов в эксперты проводится в два этапа.

2. Проведение предварительного совещания, на котором определяются цели и задачи групп.

3. Подготовка и рассылка исходных опросных листов.

4. Проведение самооценки. Проанализировав необходимую информацию, эксперты заполняют в течение пяти дней анкеты и предоставляют их в бюро управления качеством. Рабочая группа, рассмотрев полученную информацию, комплексировать экспертные оценки по каждому критерию и вносит результат в оценочный лист. Комплексирование значений «уровней совершенства» критериев Модели рассчитываются с учетом

весовых коэффициентов подкритериев и составляющих.

Для удобства восприятия полученной информации по общему числу баллов можно построить лепестковую диаграмму (рисунок 1).

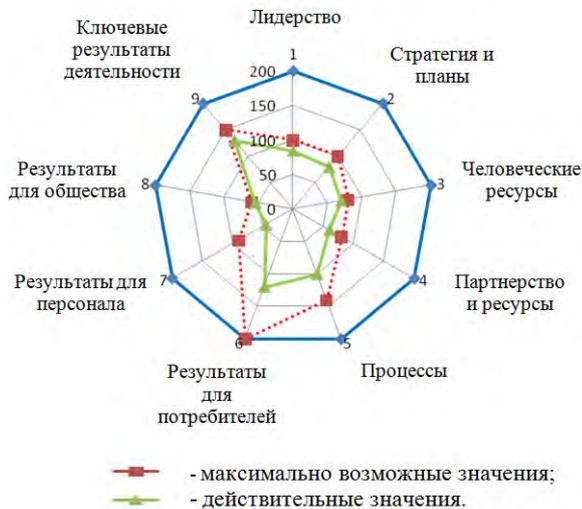


Рисунок 1 – Результаты самооценки в техническом отделе

Результаты проведения самооценки позволили сделать вывод о том, что в организации низкая удовлетворенность внутреннего персонала (всего 45 баллов из максимальных 90).

Для определения насколько представление руководителей о положении дел в организации соответствует мнению работников разработана анкета экспресс-опроса. В анкетировании приняли участие 20 сотрудников организации. Опрос проводился как среди руководителей, так и среди работников организации.

Для обработки результатов опроса воспользовались методикой модели Тито-Конта. Оценка каждого из установленных критериев и СМК в целом вычисляется исходя из средней оценки по организации:

$$I_{\text{средняя}} = \frac{I_{\text{рук}} + I_{\text{раб}}}{2}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{рук}}$  – средняя оценка руководителей;  $I_{\text{раб}}$  – средняя оценка работников.

Оценку руководителей  $I_{\text{рук}}$  и соответствующую оценку работников  $I_{\text{раб}}$  по каждой из 9 оценочных категорий сравнили с максимально возможной оценкой по критерию  $I_{\text{max}}$  и вычислили коэффициент адекватности менеджмента  $K_{\text{AM}}$ :

$$K_{\text{AM}} = \frac{I_{\text{рук}} - I_{\text{раб}}}{I_{\text{max}}}. \quad (2)$$

По результатам расчетов построена диаграмма (рисунок 2).

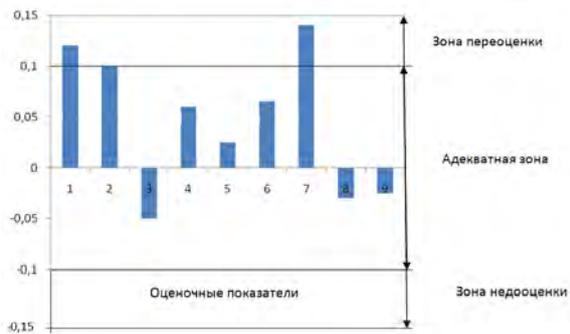


Рисунок 2 – Значения коэффициентов адекватности менеджмента

Ответы на вопросы по критериям «Лидерство» и «Удовлетворенность персонала» попадают в зону переоценки возможностей менеджмента: от 0,1 до 1 (верхняя точка включается в зону). Мнения руководителей и работников расходятся, что может привести к внутренним сопротивлениям коллектива, а преобразования, инициируемые руководством, могут быть неэффективными. Необходимо выявить причины несоответствий, установить более тесный контакт с персоналом, укрепить корпоративную культуру.

Остальные показатели попадают в зону адекватной оценки возможностей менеджмента: от -0,1 до 0,1. Показатели этой зоны характеризуют адекватное восприятие работниками управленческих решений, руководитель и коллектив руководствуются одинаковыми принципами в работе, что способствует гармоничному развитию организации. В зону недооценки возможностей менеджмента, которая отражает недостаточные лидерские качества, не попал ни один критерий.

Коэффициент согласия в коллективе  $K_{\text{СК}}$  отражает полярность мнений внутри организации:

$$K_{\text{СК}} = \frac{n \sum (I_{\text{paб}i})^2 - \sum (I_{\text{paб}i})^2}{n^2}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{СК}}$  - коэффициент согласия в коллективе;  $n$  - число опрошиваемых работников;  $I_{\text{раб}}$  - оценка работника;  $i$  - номер вопроса.

Эффективность изменений в той или иной области определяется с помощью матрицы возможных улучшений (рисунок 3). В зависимости от того, в какую из зон попадает точка с координатами ( $K_{\text{СК}}$ ,  $K_{\text{AM}}$ ), определяем степень возможности улучшений по исследуемому показателю.

На рисунке 3 выделены четыре зоны анализа: эффективная, рабочая, умеренная и проблемная. Показатели критериев «Человеческие ресурсы», «Партнерство и ресурсы», «Процессы», «Результаты для потребителя» и «Ключевые результаты деятельности» попадают в эффективную зону. Это свидетельствует о том,

что в этой области работа ведется на хорошем уровне и результативность улучшений высока.

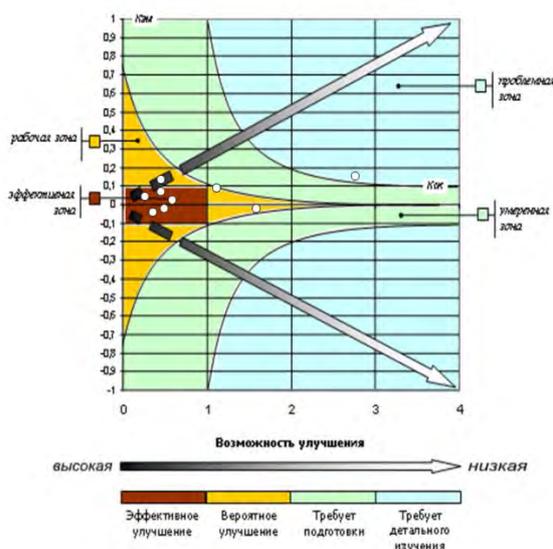


Рисунок 3 – Матрица возможности улучшений

Критерии «Лидерство», «Стратегия и планы» и «Результаты для общества» попадают в рабочую зону, что указывает на возможность

значительных улучшений в этой сфере. Показатель критерия «Результаты для персонала» попал в проблемную зону. В этой области необходимы предварительный анализ коэффициентов и детальная разработка программы улучшений.

5. Заключительное совещание. По результатам самооценки руководитель рабочей группы подготавливает заключение, содержащее обобщенные данные самооценки и рекомендации по улучшению.

Было предложено следующее. Разработать анкету удовлетворенности внутреннего персонала с целью уточнения потребностей и вовлечения персонала в процесс постоянного улучшения. Пересмотреть должностные инструкции работников технического отдела. Развивать горизонтальные связи между отделами организации, которые носят как формальный, так и не формальный характер, это будет восполнять недостаток информации об общей ситуации. Введение программы непрерывного развития сотрудников. Создать благоприятный психологический климат в организации при помощи организационной культуры и участия руководства в решении конфликтных ситуаций.

УДК 519.876.5:681.2.084+004.032.26

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Стадник В.В.<sup>1</sup>, Подорожняк А.А.<sup>2</sup>, Коваль А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

<sup>3</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
Харьков, Украина

Анализ существующей ситуации с измерениями параметров технологических процессов [1] показал, что большинство из них имеет динамический характер. Динамический режим измерений характеризуется таким изменением измеряемой величины за время проведения измерительного эксперимента, которое может влиять на результат измерения. Вследствие этого, в теории динамических измерений наибольшее значение имеют две проблемы: восстановление измеряемого сигнала, динамично искаженного средством измерения и анализ динамической погрешности. Ранее, в работах [2 – 3], были рассмотрены модели измерительных преобразователей, позволяющих восстановить искаженный сигнал и получить оценку погрешности измерений. В таких моделях измерительных преобразователей настраиваемые параметры существенно уменьшают динамическую погрешность измерений [4]. Однако линейные методы управления настраиваемыми параметрами модели преобразователя по своим возможностям имеют ограничения.

Использование более эффективных методов восстановления динамично искаженных сигналов (решение обратной задачи в метрологии) требует комплексного подхода к решению поставленных проблемных вопросов. Одним из таких подходов является использование нейронных сетей для разработки динамических моделей первичных измерительных преобразователей.

Целью данного доклада является обоснование структурной схемы нейросетевой модели измерительного первичного преобразователя при динамических технологических измерениях.

В общем случае передаточная функция первичного измерительного преобразователя описывается известным линейным уравнением [5].

Связь между выходом и входом дискретной модели датчика может быть представлена в виде рекуррентного уравнения:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y(k-i) + \sum_{j=0}^n \beta_j \cdot y(k-j), \quad (1)$$

где  $u(k)$ ,  $y(k)$  – отсчеты, соответственно, входного и выходного сигналов датчика в дискретные моменты времени  $t_k = k \cdot T$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$

Значения параметров приведенной дискретной модели можно определить на основе линейной нейросетевой модели датчика, структурная схема которой приведена на рис. 1.

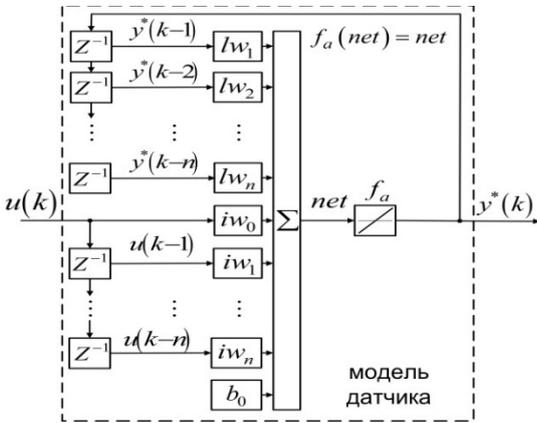


Рисунок 1 Структурная схема нейросетевой модели первичного измерительного преобразователя

Данная модель представляет собой рекуррентную нейронную сеть, состоящую из одного нейрона с линейной функцией активации с нулевым смещением. При этом структура этой модели полностью соответствует выражению (1). Рекуррентное уравнение, определяющее связь между входом и выходом нейросетевой модели датчика, запишется в виде:

$$y^*(k) = f_a(net) = net = \sum_{i=1}^n lw_i \cdot y^*(k-i) + \sum_{j=0}^n iw_j \cdot u(k-j), \quad (2)$$

где  $y^*(k)$  – отсчеты выходного сигнала нейросетевой модели в дискретные моменты времени  $t_k = k \cdot T$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $u(k-1)$ ,  $y^*(k-1)$  – отсчеты, соответственно, входного сигнала датчика и выходного сигнала нейросетевой модели в предыдущие дискретные моменты, времени  $t_{k-1} = (k-1) \cdot T$ ;  $lw_i$ ,  $iw_j$  – настраиваемые весовые коэффициенты нейросетевой модели датчика,  $i = 0, n$ ,  $j = 1, n$ .

При соответствующем способе формирования входной и целевой учебных последовательностей, которые отражают связь между входом и выходом дискретной модели датчика, весовые коэффициенты нейросетевой модели могут быть настроены в процессе его обучения таким образом, что при заданном уровне точности (не превышает машинную точность вычислений и округления промежуточных результатов) отсчеты выходного сигнала нейросетевой модели равны соответствующим дискретным отсчетам выходного сигнала

датчика. При этом указанная возможность следует из линейности и соответствия дискретной и нейросетевой модели датчика.

Таким образом, если в результате обучения нейросетевой модели датчика, отсчеты ее выходного сигнала равны соответствующим дискретным отсчетам выходного сигнала датчика, то значение настроенных параметров нейросетевой модели будут значениями параметров дискретной модели (1) датчика. В качестве критерия обучения рассматриваемой модели необходимо выбирать функцию погрешности между желаемым и реальным выходом нейросетевой модели первичного измерительного преобразователя.

Для иллюстрации возможностей предлагаемой нейросетевой модели первичного измерительного преобразователя было проведено математическое моделирование в программной среде Matlab.

В качестве примера был рассмотрен датчик радиометрической температуры с передаточной функцией вида:

$$W_S(p) = \frac{1}{(T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi_1 \cdot T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)}, \quad (3)$$

где  $T_1 = 50$  с,  $T_2 = 25$  с – постоянные времени датчика,  $\xi_1 = 0.7$  – коэффициент демпфирования.

Значение длины учебных последовательностей –  $N = 540$ , при этом заданы следующие значения: периода квантования  $T = 1$  с и параметра  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ , который определяет длину учебных последовательностей  $N$ .

График изменения величины погрешности между выходами непрерывной и дискретной моделями датчика в виде разницы реакций указанных моделей на одно и то же влияние, приведен на рис. 2.

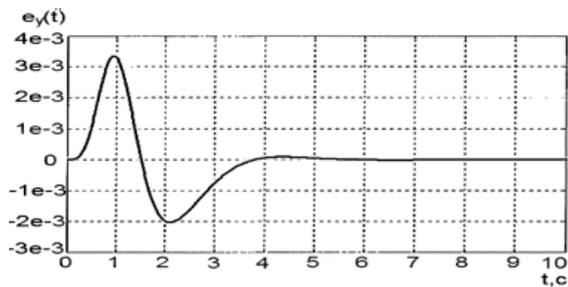


Рисунок 2 График величины изменения погрешности между выходами непрерывной и дискретной нейросетевой модели датчика

Разработанная динамическая дискретная нейросетевая модель первичного измерительного преобразователя адекватна непрерывной модели данного преобразователя. В качестве меры адекватности была выбрана разница реакций указанных моделей на одно и то же влияние,

которая по результатам моделирования не превышает значения  $4 \cdot 10^{-3}$ . При длине учебных последовательностей  $N = 540$  и периоде квантования  $T = 1$  с погрешность обучения динамической нейросетевой модели первичного измерительного преобразователя после 100 эпох обучения составляет  $7.6 \cdot 10^{-7}$ .

Полученные результаты могут быть полезны при исследованиях и проектировании интеллектуальных первичных измерительных преобразователей и интеллектуальных измерительных информационных систем.

1. Hashemian H.M. Monitoring and measuring I&C performance in nuclear power plants – USA: International Society of Automation, 2014. – 376 с.

2. Materassi D. Reconstruction of topologies for acyclic networks of dynamical systems // Proc. of the American Control Conference. – 2011. – P.37– 41.  
 3. Cessac B. Neural Networks as dynamical systems // International Journal of Bifurcations and Chaos. – 2010. – № 6 (20). – P. 1585–1629.  
 4. Любченко Н.Ю. Дослідження моделі мікропроцесорного вимірювача системи терморегулювання / Н.Ю. Любченко, А.О. Подорожняк, А.М. Клименко, В.М. Гурський // Стандартизація. Сертифікація. Якість. – 2016. – № 5. – С. 54–61.  
 5. Полярус О.В. Динамічна нейромережева модель первинного перетворювача / О.В. Полярус, А.О. Подорожняк, А.О. Коваль // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – 2014. – № 35. – С. 152–160.

УДК 681.324

## СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СРЕДСТВАМИ ТЕХНОЛОГИИ WINDOWS PRESENTATION FOUNDATION

Стадник В.В.<sup>1</sup>, Скорин Ю.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Харьковский национальный экономический университет, Харьков, Украина

Анализ текущего состояния парка средств измерительной техники свидетельствует о том, что состав штатных средств измерительной техники, существующий в наличии и который необходим для обеспечения качественного проведения учебного процесса, как правило, ограничен, часто требует ремонта, восстановления или замены, поэтому такое направление повышения эффективности учебного процесса, как создание виртуальных измерительных приборов трудно переоценить [1].

Дальнейшее совершенствование информационно-коммуникационных технологий требует поиска альтернативных способов совершенствования парка средств измерительной техники, например, путем разработки и создания виртуальных измерительных приборов [2].

Развитие вычислительной техники, компьютеризация всех отраслей народного хозяйства, наталкивает на мысль об использовании мощного технологического потенциала компьютеризации в деле совершенствования процесса измерений.

Поиски решения привели к необходимости создания виртуальных приборов, аналоги которых уже существуют за рубежом и демонстрируют значительные преимущества перед так называемыми традиционными приборами.

Аппаратная составляющая виртуальных измерительных приборов, в настоящее время является достаточно определенной и заключается в сочетании персонального компьютера с аналоговым

адаптером (датчиком) измерительной и диагностической информации [3].

Такое сочетание осуществляется с помощью платы сбора данных, основными элементами которой в общем случае могут быть: аналого-цифровой преобразователь, порт, запоминающее устройство, мультиплексор, преобразователь напряжения и преобразователь код-код.

Также возможно включение в состав платы сбора данных микропроцессорного контролера, который выполняет функции управления, синхронизации и поддержки программного обеспечения.

Программная же составляющая виртуальных измерительных приборов, в частности – вопрос визуализации виртуальных устройств еще требует значительного совершенствования.

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема построения виртуального измерительного прибора.

В зависимости от назначения виртуальные измерительные приборы могут включать в свой состав:

- базы данных,
- интерактивные электронные таблицы,
- временные диаграммы,
- графики,
- предоставляющие дополнительную диагности-ческую информацию, чем обеспечивают:
- повышение достоверности контроля параметров и качества диагностики,

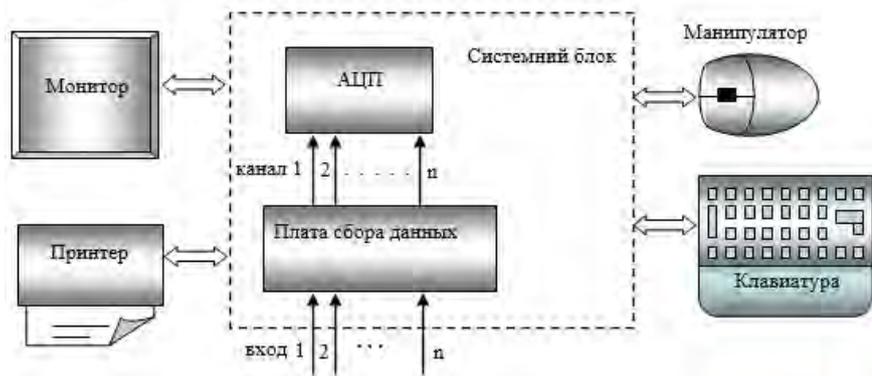


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема виртуального измерительного прибора

- отражают физические процессы, происходящие «внутри» прибора во время проведения измерительного эксперимента, чем предоставляют важную информацию разработчику для дальнейшего совершенствования виртуального прибора и расширения его функциональных возможностей.

Вторым, не менее важным направлением использования виртуальных приборов, является построение на их основе компьютерных моделей-тренажеров с целью совершенствования и повышения наглядности обучения и повышения квалификации персонала, пользователей виртуальных приборов [1-4].

Так, до настоящего времени, визуализация виртуальных измерительных приборов осуществлялась с помощью традиционной, существующей уже несколько десятилетий, Windows Forms технологии, с использованием при построении интерфейса устаревших компонентов User32 и GDI / GDI +, которые не могут устранить фундаментальные ограничения, источником которых являются системные элементы, созданные десятилетия назад.

Также важным недостатком Windows Forms технологии является использование растровой графики, приводящей к потере четкости, искажению изображения в виде, например, зазубренных краев элементов.

Кроме того, важным признаком современных виртуальных приборов является их насыщенность элементами, сложная графика, поэтому они требуют значительных ресурсов, что ведет к снижению производительности программных продуктов.

При этом аппаратное ускорение реализовать невозможно, потому что все графические процедуры, привязаны к центральному процессору и графический процессор видеокарты остается незадействованным.

Вот далеко не полный перечень недостатков традиционного подхода к визуализации виртуальных измерительных приборов.

Современное решение проблемы визуализации возможно с помощью технологии

Windows Presentation Foundation (WPF), абсолютно новой системы графического отображения для Windows, которую представила корпорация Microsoft.

К наиболее кардинальным изменениям, которые приносит WPF в мир визуализации виртуальных устройств можно отнести:

- аппаратное ускорение;
- графический механизм DirectX;
- независимость разрешения экрана;
- возможность гибкого выбора внешнего вида элементов управления;
- Web-образная модель компоновки;
- отображение объектов наиболее оптимальным способом;
- многофункциональная модель рисования;
- модель с форматированным текстом;
- анимация, как принцип программирования;
- поддержка аудиовизуальной среды;
- стили и шаблоны;
- декларативный пользовательский интерфейс;
- приложения со страничной организацией.

Подводя итог, можно сказать, что по сути, новая система графического отображения Windows на базе современной технологии WPF позволяет создавать программное обеспечение виртуальных измерительных приборов, а именно – решать проблему визуализации виртуальных приборов способом, который невозможен или, по крайней мере, нецелесообразен, сложен или затратен при разработке виртуальных измерительных приборов традиционными средствами Windows Forms.

1. Мак-Дональд Мэтью. WPF 4: Windows Presentation Foundation в .NET 4.0 с примерами на C# 2010 для профессионалов : пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс». – 2011. – 1024 с.
2. Скорин Ю.І., Щербаков О.В., Магдалиць Т.І. Виртуальні вимірювальні та діагностичні прилади // Інформаційні технології та захист інформації: збірник наукових праць. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип.4 (102). – Т.1. – С. 65–68.
3. Скорин Ю.І., Стаднік В.В., Клименко А.М. Виртуальні прилади у вимірювальній лабораторії // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інформатика

- та моделювання. – Харків: НТУ “ХП”. – № 38. – 2012. – С. 84-92.
4. Скорін Ю.І., Подорожняк А.А., Стадник В.В. Аналіз основних особливостей технології Windows

Presentation Foundation // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип.8 (106). – С. 257.

УДК 005.6:658.6

## ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ ФИЗКУЛЬТУРНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЙ УСЛУГИ

Хорлоогийн А.С., Казанская В.Д., Фомиченко Е.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

По результатам анализа современного состояния процесса предоставления физкультурно-оздоровительных услуг в тренажерном зале разработана структура организационно-технической составляющей системы менеджмента качества, гарантированно обеспечивающая требования клиента, которая включает: 1) подсистему идентификации целей, 2) подсистему диагностики физического состояния, 3) подсистему формирования программы физической подготовки, 4) подсистему анализа и обратной связи.

Ключевую роль в структуре системы играет подсистема диагностики физического состояния клиента тренажерного зала, которая предполагает определение интегрального показателя физического состояния клиента, представляющего собой совокупность показателей физической работоспособности и функциональных параметров организма. Оценка интегрального показателя характеризует возможность клиента достигнуть поставленных целей.

Основу подсистемы составляет модульная система формирования контрольного комплекса показателей функционального и физического состояния клиента, поддерживаемого комплексом организационно-технических средств, имеющимся в организации, и обеспечивающим достоверную оценку интегрального показателя исходного состояния клиента. Методологической основой системы принят принцип функциональной взаимозаменяемости [1, 2].

Аналогами предлагаемого подхода являются системы назначения контрольного комплекса показателей качества промышленных технических объектов. Например, формирование комплексов показателей точности зубчатых передач в соответствии с ГОСТ 1643.

Основным рекомендуемым способом контроля функционального и физического состояния человека является медицинский контроль, который подразумевает использование клинических и параклинических методов медицинского обследования [3]. Как правило, тренажерные залы, предоставляющие физкультурно-оздоровительные услуги, не имеют в наличии сложного оборудования медицинского контроля показателей

функционального состояния и физической подготовленности клиента.

Тем не менее при определенных ограничениях можно без потери достоверности интегральной оценки исходного состояния клиента воспользоваться средствами и методами контроля, широко применяемыми в практике спортивной медицины и физического воспитания с учетом имеющейся материально-технической и методической базы организации. К ним относятся функциональные пробы, тестовые задания, в том числе и с применением методов экспертных оценок. Задача сводится к разработке методики формирования взаимозаменяемого комплекса измеряемых и (или) оцениваемых показателей, адаптированного по возможности под возможности тренажерного зала с одной стороны, и отвечающего критерию необходимой информативности, с другой стороны.

Очевидно, что интегральная оценка исходного состояния клиента тренажерного зала имеет иерархическую структуру, сформированную по критерию необходимой информативности.

На первом уровне иерархии предлагается интегральную оценку исходного состояния клиента в зависимости от вида услуг и целей физического совершенствования представить тремя комплексными показателями [2, 3]:

1) ФР – показатель физического развития, характеризующий физическое развитие клиента (кожно-жировая складка, динамометрия кистевая и др.);

2) ФС – показатель функционального состояния, характеризующий состояние сердечно-сосудистой, дыхательной и других функциональных систем клиента (проба Ромберга, проба Штанге и др.);

3) ФП – показатель физической подготовленности, характеризующий состояние физической подготовленности клиента (бег 60 м, прыжок вверх с места и др.).

Соответственно, объективно охарактеризовать исходное состояние клиента возможно с помощью подобранного контрольного комплекса единичных (изменяемых) показателей, представляющих для конкретного вида услуг и целей физического совершенствования все три ком-

плексных показателя, причем оцененная интегральная информативность комплекса должна быть не ниже некоторого критического значения. Это условие обеспечивает взаимозаменяемость альтернативных комплексов показателей.

Интегральная оценка исходного состояния клиента (ОИС) в общем случае может быть представлена функцией связи некоторого вида [4]:

$$\text{ОИС} = \text{ФР} \cdot \text{ФС} \cdot \text{ФП}, \quad (1),$$

где ФР – комплексный показатель физического развития клиента; ФС – комплексный показатель функционального состояния клиента; ФП – комплексный показатель физической подготовленности клиента.

В свою очередь, оценка каждого комплексного показателя может быть представлена некоторой совокупностью оценок второго уровня иерархии. В общем случае декомпозиция оценок может быть продолжена до третьего и более уровней иерархии.

Установлено, например, что комплексная оценка физического развития клиента ФР может быть представлена функцией связи некоторого вида:

$$\text{ФР} = \text{ФР}_a \cdot \text{ФР}_b \cdot \text{ФР}_v, \quad (2)$$

где ФР<sub>а</sub> – комплексный показатель физического развития клиента по габаритному уровню варьирования (длина тела в различных положениях, окружность частей тела и др.); ФР<sub>б</sub> – комплексный показатель физического развития клиента по компонентному уровню варьирования (оценка жировой, мышечной и костной масс); ФР<sub>в</sub> – комплексный показатель физического развития клиента по пропорционному уровню варьирования (соотношение размеров отдельных и конечностей с длиной тела и между собой).

Показатели ФР<sub>а</sub>, ФР<sub>б</sub>, ФР<sub>в</sub> могут быть представлены как единичными показателями (измеряемыми), так и комплексными показателями.

Следует отметить, что модель оценивания информативности комплекса показателей, формирующих интегральную оценку исходного состояния клиента, и модель оценивания исходного состояния клиента принципиально отличаются друг от друга и, в первую очередь, задачами, которые они решают.

Задача модели оценивания исходного состояния клиента – обеспечить достоверность результатов оценивания и их пригодность для принятия решения о программе и индивидуальном плане физической подготовки клиента.

Задача модели оценивания информативности комплекса показателей – верифицировать состав контрольного комплекса показателей по критерию необходимой и достаточной

информативности интегральной оценки исходного состояния клиента.

Определим информативность как свойство контрольного комплекса показателей, характеризующее его возможность давать оценку исходного состояния клиента, которая:

1) корректна с точки зрения принятия адекватного решения о программе и индивидуальном плане физической подготовки клиента;

2) эквивалентна оценке, полученной альтернативным контрольным комплексом показателей.

Каждый тренажерный зал может сформировать для одного и того же вида услуги свой контрольный комплекс показателей, привязываясь прежде всего к имеющейся у него материально-технической и методической базе. Определим норму допустимой информативности интегральной оценки исходного состояния клиента как «не менее 100 баллов», т.е. ИОИС ≥ 100.

Очевидно, что в зависимости от вида физического совершенствования и поставленной цели нормы ИФР, ИФС, ИФП информативности комплексных оценок показателей ФР, ФС, ФП (1), как доли допустимой информативности ИОИС интегральной оценки ОИС, могут меняться и, возможно, существенно. Для оценивания этих долей следует применить методы экспертного оценивания [4, 5].

Для решения задачи декомпозиции нормы ИОИС обосновано применение простого метода балльных оценок [4]. На данном этапе это наиболее комфортный для экспертов метод экспертного оценивания. Выбор нормы допустимой информативности интегральной оценки в 100 баллов также не случаен. В совокупности метод и норма ассоциируются с оцениванием «доли части в целом» в процентах и дают достаточно приемлемую достоверность результатов оценивания.

1. Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. Методология описания сети процессов: монография / П.С. Серенков, А.Г. Курьян, В.Л. Соломахо. – Минск : БНТУ, 2006. – 484 с.
2. Хорлоогийн, А.С. Определение концепции качества физического совершенствования человека в контексте качества жизни / А.С. Хорлоогийн, П.С. Серенков, В.Е. Васюк, С.Г. Ковель // Методы и приборы измерений. – 2011. – № 2. – С. 152–158.
3. Макарова, Г.А. Спортивная медицина / Г.А. Макарова. – М. : Советский спорт, 2002. – 478 с.
4. Орлов, А.И. Современная прикладная статистика / Орлов А.И. // Заводская лаборатория. – 1998. – № 3. – С. 52–60.
5. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Цитович Б.В.<sup>1</sup>, Соколовский С.С.<sup>2</sup>, Петрусенко П.А.<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский государственный институт повышения квалификации  
по стандартизации, метрологии и управлению качеством<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Анализ показывает, что на практике часто не различают такие понятия как «измерительный контроль» и «измерение», хотя при значительном сходстве этих процессов между ними есть и принципиальные различия.

Под измерением свойства обычно понимают экспериментальное нахождение количественной оценки его интенсивности. Результат измерения может использоваться при исследовании объектов, при их сравнении и при контроле. Принципиальное отличие контроля от измерения заключается в его целевой установке – установление соответствия свойств объекта определённым требованиям.

Для упорядочения разработки методик выполнения измерений (МВИ) предназначен действующий сегодня в Республике Беларусь стандарт ГОСТ 8.010 – 2013 «Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения». Очевидно, что при разработке методик измерительного контроля требования этого стандарта должны полностью соблюдаться. В результате у производителей, не углубляющихся в различия контроля и измерений, и даже у ряда специалистов, профессионально занимающихся измерениями, складывается впечатление, что разработка методик измерительного контроля (МИК) также регламентирована этим стандартом, хотя это нельзя считать достаточно корректным в силу ряда особенностей, которые должны учитываться при подготовке к осуществлению измерительного контроля.

При проектировании МИК в соответствии с ГОСТ 16504 необходимо обеспечить:

1. *Получение действительного значения измеряемого параметра.*

2. *Сопоставление действительного значения параметра с установленными для него нормами для обнаружения его соответствия или несоответствия требованиям.*

Принятый способ нормирования параметра существенно влияет на постановку задачи измерительного контроля (измерений) и структуру её решения. В частности, назначение допустимой погрешности измерений для получения действительных значений параметра с *двухпредельным ограничением* в метрологии рассматривается как тривиальная задача с возможностью применения типового решения. При *однопредельном*

*нормировании* контролируемого параметра ситуация усложняется, поскольку в этом случае отсутствуют типовые решения и требуется использовать индивидуальный подход и соответствующее обоснование назначаемой допустимой погрешности измерения.

Особенности реализации параметра (физической величины) на объекте являются важными свойствами объектов при их метрологическом моделировании и оказывают существенное влияние на проектирование методики контроля. *Вид реализации параметра*, представленного на объекте физической величиной, зависит от особенностей самой физической величины. Если масса реализуется на изделии, (объекте измерения) как одна физическая величина, то линейные размеры (длина) реализуются как множество номинально разных и номинально одинаковых величин, то же можно сказать о твердости, шероховатости, оптических характеристиках. Такой геометрический параметр шара, как («диаметр сферы») реально воспроизводится на детали как бесконечное множество номинально одинаковых толщин, что очень важно для измерительного контроля детали.

Параметр, который подлежит измерительному контролю, с позиций оценки его сложности может быть «простым» или «интегральным». «Простые параметры» объекта характеризуются единичным значением (масса детали, её объём, сопротивление резистора и др.). «Интегральные параметры» оценивают в соответствии с некоторыми правилами, алгоритмами, установленными зависимостями, например, параметры шероховатости поверхности. Такие параметры шероховатости, как средний шаг неровностей или среднее арифметическое отклонение профиля рассчитывают как среднее арифметическое значение из ряда «простых параметров» (шагов и отклонений профиля от средней линии). «Интегральные параметры» приписывают также величинам, характеризующим переменный электрический ток. Установленные правила оценивания «интегральных параметров» могут быть реализованы в преобразующих устройствах средства измерений, как это сделано в профилометрах или в приборах для измерений параметров переменного тока. В иных случаях для получения оценки интегрального результата измерительного контроля приходится выполнять некоторый установленный

набор действий (математическая обработка результатов измерений), что по сути можно считать косвенными измерениями. В такой ситуации методика измерительного контроля часто представляет собой комплекс нескольких МВИ и обязательно должна включать элементы, регламентирующие обработку результатов измерений.

Значительную часть параметров изделий можно считать практически неизменными (на протяжении времени контроля и в течение длительного промежутка времени после него). В отличие от них величины, характеризующие некоторый технологический процесс, обычно изменяются во времени (закономерно или стохастически). В таком случае их можно рассматривать как бесконечное множество физических величин номинально разных или номинально одинаковых, и их измерения в значительной степени определяются этой спецификой. Например, температура некоторого объекта есть бесконечное множество температур, локализованных по времени (и по месту). *Изменяемость параметров во времени* в некоторых случаях может привести к измерениям в динамическом режиме, в результате чего возможно возникновение динамических погрешностей. Это обязательно следует учитывать при разработке МВИ и, если есть возможность, выбирать такие средства измерений, быстроедействие которых обеспечит «квазистатический режим».

Немалое значение при проектировании МИК имеет также решение вопросов обеспечения *инструментальной доступности параметров*, под которой понимают возможность обеспечить взаимодействие чувствительных элементов средств измерений с элементами объекта измерений в нужных точках для корректного «съёма» измерительной информации. Для обеспечения требуемого взаимодействия СИ с объектом измерений может проводиться, например, частичная разборка объекта (снять крышку, отпаять элемент электросхемы и т.п.), а иногда приходится «ломать» объект (разрушающий контроль).

Рассмотренные нюансы, на которые должны обращать внимание специалисты, организующие измерительный контроль объектов, позволяют сделать *вывод о необходимости чёткого предварительного определения («спецификации») измеряемого или контролируемого параметра*. Набор описаний нормированных измеряемых или контролируемых параметров позволяет представить объект в виде метрологической

модели. Среди возможных моделей объектов измерительного контроля представляется необходимым различать две группы: концептуальные и экспериментальные модели. Концептуальные модели создают аналитическим путём. Так, разработку конструкции детали при проектировании нового изделия начинают с идеальной модели объекта. Затем переходят к получению реалистической модели, которая отличается от идеальной из-за различных технологических искажений. Особую роль играет формальная модель, необходимая для установления соответствия ей реального объекта при контроле – нормативная модель. Для выстраивания методики выполнения измерений опираются на аналитически построенные реалистические модели, которые подтверждает или опровергает экспериментальная модель, построенная по результатам измерений. Однако для заключения о годности объекта может быть использована не любая экспериментальная модель, а только та, которая адекватно представляет объект в рамках поставленной задачи контроля. Например, номинально цилиндрическая поверхность рукоятки управления станком может считаться круглой в поперечном сечении даже при значительном различии толщин («диаметров»), но такой подход совершенно неоправдан при контроле подшипниковой шейки вала. При этом существенными могут быть не только элементарные погрешности формы, но и другие, описываемые более сложными моделями, для построения которых приходится использовать метод проб и ошибок, последовательно приближаясь к некоторой оптимальной модели (в рамках поставленной задачи контроля) и последовательно используя предварительную и уточнённые модели. Оптимальной (адекватной) моделью будет такая, отличиями которой от реального объекта в рамках поставленной задачи можно пренебречь. Критерием адекватности экспериментальной модели можно считать пренебрежимо малую методическую погрешность (погрешность идеализации объекта) при применении модели в процессе измерений (контроля).

Таким образом, в ходе проектирования методики измерительного контроля необходимо создать нормативную модель объекта и разработать метод получения адекватной экспериментальной модели. Соответствие этой экспериментальной модели нормативной является подтверждением годности контролируемого объекта.

**НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ  
МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ГУ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ЦЕНТР  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ, КОНТРОЛЮ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ»**

**Павлов К.А., Бояровская К.С.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время перед промышленными предприятиями Республики Беларусь стоит проблема повышения рентабельности и конкурентоспособности в условиях быстрого изменения рыночной среды. Для удержания позиций на рынке многие организации объединяются в более крупные – холдинги и т.д. Однако при преобразовании или объединении небольших организаций в более крупные возникает ряд сложных задач, одной из которых является гармонизация систем менеджмента.

Гармонизация систем менеджмента может проходить по одному из следующих направлений:

- создание абсолютно новой системы менеджмента (формирование системы менеджмента «с нуля»);
- расширение области применения действующей системы менеджмента на деятельность объединившихся организаций.

Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. Так разработка абсолютно новой системы менеджмента для большинства организаций приводит к большим затратам (финансовыми, временными и др.). При этом при расширении области применения действующей системы менеджмента наряду с небольшими ресурсными затратами, сотрудниками должны учитываться специфики всех процессов объединившихся организаций, в частности, в случае неоднородности их деятельности.

Одной из организаций Республики Беларусь, руководство которой после реорганизации приняло решение о расширении области применения действующей системы менеджмента, является ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (далее – Гидромет), который с 1 января 2015 года объединил в себе «Республиканский центр радиационного контроля и мониторинга окружающей среды» и «Республиканский гидрометеорологический центр», и уже с 1 июля 2017 года к нему присоединились областные гидрометы. В настоящее время организация получило название Белгидромет.

У каждой организации, которые вошли в структуру Белгидромета, на различном уровне была разработана, внедрена и сертифицирована система менеджмента качества (далее – СМК), как часть общей системы менеджмента

организации. Поэтому после реорганизации высшее руководство Белгидромета утвердило план по объединении всех действующих СМК в одну, которая будет охватывать деятельность всего Белгидромета, а также соответствовать требованиям Государственного стандарта Республики Беларусь СТБ ISO 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [1].

В качестве базы для гармонизации действующих СМК на деятельность всего центра была выбрана система качества службы авиационно-метеорологического обеспечения, доверие к результативности и эффективности которой неоднократно подтверждено соответствующими сертификатами в национальной и международной системах подтверждения соответствия. СМК службы авиационно-метеорологического обеспечения была сертифицирована на соответствие требованиям СТБ ISO 9001 версии 2009 года, поэтому при гармонизации ее с другими СМК дополнительной задачей стало проведение внутреннего аудита и принятие комплекса мер по совершенствованию СМК на соответствие требованиям СТБ ISO 9001 версии 2015 года. Параллельно с совершенствование действующей СМК службы авиационно-метеорологического обеспечения необходимо было гармонизировать «эталонную» СМК на деятельность всего Белгидромета.

В ходе проведения процесса гармонизации СМК был выявлен ряд специфичных задач, одними из которых являются:

- формирование процедуры формирования СМК Белгидромета с учетом требований новой версии стандарта СТБ ISO 9001 (т.н. переходная стадия действия СМК);
- описание процедуры оценки результативности и эффективности СМК на основе сбора неоднородной информации по оценкам результативности и эффективности отдельных процессов;
- описание процедуры оценки удовлетворенности потребителей на основе информации, получаемой от различных категорий потребителей образованной организации.

В рамках решения первой задачи был разработан план перехода действующей СМК, взятой за основу для всего Белгидромета, на

соответствие требованиям СТБ ISO 9001 новой версии. При этом было принято решение, что совершенствование СМК наиболее оптимально проводить с использованием цикла «PDCA». Параллельно по результатам пересмотра была проведена разработка или актуализация основных процессов. Для всех процессов была предложена типовая структура их описания, которая, помимо стандартных разделов (введение, записи, ответственность и т.д.), включала в себя положения по оценке результативности процесса, оценки рисков реализации данного процесса.

По результатам деятельности по описанию основных процессов СМК Белгидромета была выделено семь процессов. Для проведения оценки рисков каждого процесса на стадии идентификации рисков использовалась информация о ресурсах, необходимых для реализации конкретного процесса. Для определения всех ресурсов каждого из семи процессов использовалась функциональная модель сети бизнес-процессов, описанных в нотации IDEF0 в соответствии с правилами построения данных моделей [2, 3]. Количественное оценивание выявленных рисков, согласно рекомендациям ISO 31010, проводилась по методу «FMEA-анализ».

Также одним из новых требований к СМК согласно СТБ ISO 9001 (раздел 4) является определение контекста организации, который включает в себя анализ сильных и слабых сторон, а также анализ потребности и ожиданий заинтересованных сторон. Для выявления слабых и сильных сторон деятельности Белгидромета был применен SWOT-анализ.

В рамках решения задачи по оценке результативности и эффективности СМК Белгидромета была разработана система сбалансированных показателей, которая включает как показатели для деятельности Белгидромета в целом, так и отдельные показатели для каждого процесса. Также был проработан алгоритм сбора информации, необходимой для оценки результативности процессов от всех структурных элементов Белгидромета.

Отдельной и важной задачей при создании СМК Белгидромета стала задача оценки удовлетворенности потребителей. Сложность задачи заключается в большой и разнообразной группе потребителей услуг Белгидромета (от Президента Республики Беларусь до рядовых граждан страны).

Для решения задачи по сбору и анализу информации по удовлетворенности потребителей были выделены их 4 категории:

- органы государственного управления Республики Беларусь;
- средства массовой информации,
- секторы экономики;
- население страны.

Для каждой категории потребителей был разработан метод сбора информации (анкеты) и информацию которую необходимо предоставлять потребителям. Для обработки оценок для каждой категории потребителей экспертным методом были установлены коэффициенты значимости. Данный подход в оценивании удовлетворенности потребителей является усложненным, но имеет высокую степень адаптации к требованиям потребителей различных категорий, что позволяет руководству Белгидромета корректно определять пути совершенствования СМК, а также адекватно оценивать удовлетворенность потребителей результатами предоставления своих услуг.

Также при решении задачи по удовлетворенности потребителей были проработаны каналы обмена информацией между Белгидрометом и каждой категорией потребителей. Уникальным каналом предоставления информации о климатических условиях в Республике Беларусь является сотрудничество Белгидромета и Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. В рамках данного сотрудничества была проработана схема осведомленности (через СМС-уведомления) населения страны о категориях климатических условий высокого уровня опасности (оранжевый и красный).

В настоящее время СМК находится на стадии внедрения в деятельность Белгидромета, а ее сертификация запланирована на конец 2017 года. Сертификация будет проводиться в национальной и международных системах подтверждения соответствия.

1. СТБ ISO 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования».
2. Методы менеджмента качества. Методология организационного проектирования инженерной составляющей системы менеджмента качества / П.С. Серенков. - М.: НИЦ Инфра-М; Мн.: Нов. знание, 2014. – 491 с.
3. Методы менеджмента качества. Процессный подход / П.С. Серенков, А.Г. Курьян, В.П. Волонтей. – М.: НИЦ ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2014. – 441 с.

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: ОСОБЕННОСТИ И НЕУЧТЕННЫЕ ФАКТОРЫ

Лебедев А.Н.<sup>1</sup>, Афоненко А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>ЗАО «Аладдин Р.Д.»

Москва, Российская Федерация

С 2011 г. в Республике Беларусь начался переход на новые стандарты крипто алгоритмов: хэширования, шифрования, выработки и проверки электронной подписи, согласования общего ключа и др. Поскольку в крипто протоколах, применяемых на практике (SSL/TLS, почтовые протоколы на основе CMS), для идентификации алгоритмов используются ASN.1-структуры, встал вопрос стандартизации структур данных, описывающих новые криптографические алгоритмы.

По этой причине новые белорусские стандарты содержат раздел, описывающий ASN.1-структуры и идентификаторы (OID) Они применяются при использовании крипто алгоритмов. Для алгоритмов, действовавших ранее (ГОСТ 28147-89, СТБ 1176.1-99, СТБ 1176.2-99), выпущен документ (имеет статус предварительного стандарта) СТБ П 34.101.50 "Информационные технологии и безопасность. Правила регистрации объектов информационных технологий". Однако, формальное описание белорусских структур ASN.1 имеет неоднозначности. Эти неоднозначности присутствуют в описании структур для алгоритмов, сейчас напрямую не используемых в популярных крипто протоколах, и могут стать препятствием для реализации криптографических приложений только при расширении вариантов применения алгоритмов.

**СТБ 34101.31-2011. "Информационные технологии и безопасность. Защита информации. Криптографические алгоритмы шифрования и контроля целостности".**

В документе описываются следующие основные крипто алгоритмы: шифрование, выработка имитовставки, одновременно шифрование и имитозащита данных, одновременно шифрование и имитозащита ключа, хэширование, а также вспомогательные крипто алгоритмы расширения ключа и преобразования ключа (последний называется диверсификацией ключа в терминологии, принятой в РФ).

Суть одновременно шифрования и имитозащиты заключается в выполнении шифрования и вычисления имитовставки за время меньше, чем  $O(2n)$ , где  $n$ -объем данных. Эти алгоритмы встречаются в академической литературе, однако не имеют собственной структуры в CMS, что затрудняет их применение в почтовых протоколах. С натяжкой для указанных целей можно использовать структуру *EncryptedData*, применяемую для описания

шифрованных данных, при внедрении имитовставки в состав шифрованных данных с проверкой ее при расшифровании. Белорусский стандарт одновременно шифрования и имитозащиты имеет следующую отличительную особенность - в нем защищаемое сообщение делится на две части: критическое сообщение X (которое предстоит зашифровать и учесть при вычислении имитовставки) и открытое сообщение I (которое используется только при вычислении имитовставки). При таком подходе непонятно как использовать структуру *EncryptedData* для этого алгоритма: в ней нет отдельных полей для X и I. Можно предположить, что в таком случае I должно быть параметром (не входными данными) самого алгоритма, и включаться в структуру *AlgorithmIdentifier* его описания (вместе с параметром синхроросылки). Однако в стандарте про это не говорится ни слова.

Алгоритмы одновременно шифрования и имитозащиты ключа являются разновидностью алгоритмов защиты ключа (KeyWrap), при которой используется шифрование для сокрытия ключа и выработка имитовставки для контроля его целостности. Алгоритмы имеют прямое преобразование (в стандарте СТБ 34101.31-2011 оно называется алгоритмом установки защиты) и обратное (алгоритм снятия защиты). Диверсификация ключа (преобразование ключа в белорусской формулировке) предназначена для порождения нового ключа на основе старого и дополнительной информации, называемой UKM (User Keying Material). В алгоритмах защиты и диверсификации ключа он представляется только своим значением (например, в алгоритмах шифрования). Белорусские стандарты имеют особенность: в алгоритме одновременно шифрования и имитозащиты ключа определяется не только значением X, но и заголовком I, а в алгоритме диверсификации еще и уровнем D. Сразу встают вопросы:

1) Если ключ шифрования определяется тройкой (D, I, X), то как восстановить уровень ключа D после снятия защиты ключа, если параметр D вообще не фигурирует? Значит ли это, что уровень D должен быть параметром алгоритма снятия защиты ключа? Далее, алгоритм снятия защиты ключа требует априорного знания заголовка I ключа для проверки его целостности. Значит ли это, что заголовок I также должен быть параметром алгоритма снятия защиты ключа?

2) Если ключ шифрования определяется парой (I, X), то уровень D ключа должен быть параметром алгоритма диверсификации ключа. Однако в этом случае не совсем корректно говорить именно о параметре D как об уровне ключа. Скорее, это уже параметр ключевой системы. Кроме того, вопрос о заголовке I как параметре алгоритма снятия защиты ключа остается актуальным.

3) Если ключ шифрования определяется только своим значением X, то для алгоритма защиты ключа заголовок I должен быть параметром алгоритма, а для алгоритма диверсификации такими параметрами должны быть заголовок I и уровень ключа D. Это не выглядит правильным, поскольку параметр I (в меньшей степени D) является атрибутом ключа, а не алгоритма.

Эти соображения влияют на то, какие параметры содержатся в структуре *AlgorithmIdentifier* описания алгоритмов одновременно шифрования и имитозащиты (прямого и обратного преобразования) и диверсификации ключа. В стандарте СТБ 34101.31-2011 сказано, что при указании параметров I и D в структуре *AlgorithmIdentifier*, они должны представляться в виде ASN.1-типа OCTET STRING, этого недостаточно (при одновременном использовании непонятен порядок следования).

**СТБ 34101.45-2013. “Информационные технологии и безопасность. Алгоритмы электронной цифровой подписи и транспорта ключа на основе эллиптических кривых”.**

В документе описываются основные криптоалгоритмы: выработка и проверка электронной подписи и алгоритм транспорта ключа. Транспорт ключа имеет прямое преобразование (в СТБ 34101.45-2013 называется алгоритмом создания токена ключа) и обратное (разбор токена ключа). Частью алгоритма транспорта ключа является

алгоритм одновременно шифрования и имитозащиты ключа. Поэтому вопросы, связанные с интерпретацией ключа шифрования из предыдущего раздела, актуальны и в контексте транспорта ключа. Поскольку описание транспорта ключа в структуре *AlgorithmIdentifier* для почтовых приложений и протокола SSL/TLS является критичным, в стандарте СТБ 34101.45-2013 во избежание неоднозначности явно указывается, что “*поле parameters должно равняться NULL, а заголовок I транспортируемого ключа полагаться равным 0...0*”.

Поэтому встают следующие вопросы:

1) Если ключ шифрования определяется тройкой (D, I, X) или парой (I, X), то формулировка ограничивает использование алгоритма транспорта для почтовых приложений и протокола SSL/TLS ключами с нулевым заголовком. Как в первом варианте восстановить уровень ключа D после выполнения алгоритма разбора токена ключа, если в нем параметр D вообще не фигурирует?

2) Если ключ шифрования определяется только значением X, то заголовок I ключа должен быть параметром транспорта и формулировка ограничивает использование параметра I алгоритма транспорта в почтовых приложениях и протоколе SSL/TLS только нулевыми значениями.

На наш взгляд, более логично было бы в поле parameters структуры *AlgorithmIdentifier* помещать не NULL, а структуру *AlgorithmIdentifier* для одновременно шифрования и имитозащиты ключа (естественно, после ее формального описания, не допускающего неоднозначностей).

В заключение заметим, что исправление указанных недостатков было бы проще произвести, если бы белорусские стандарты описывали только криптографические алгоритмы, а их ASN.1-структуры и использование в рамках криптографических протоколов было бы описано в отдельном документе (стандарте или RFC).

УДК 535.24

## СОЗДАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ БЕЛАРУСИ ДЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Длугунович В.А.<sup>1</sup>, Никоненко С.В.<sup>1</sup>, Беляев Ю.В.<sup>2</sup>, Кучинский П.В.<sup>2</sup>, Попков А.П.<sup>2</sup>,  
Цикман И.М.<sup>2</sup>, Скумс Д.В.<sup>3</sup>, Тарасова О.Б.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси

<sup>2</sup>НИИПФП имени А.Н. Севченко БГУ

<sup>3</sup>Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

Выполнение национальной космической программы и развитие Белорусской космической системы дистанционного зондирования (ДЗ) Земли выдвигают задачи метрологического обеспечения спектрально-энергетических калибровок аэрокосмических систем. Это обусловлено тем,

что спектрорадиометрические и радиометрические измерения играют значимую роль среди методов и средств измерений, используемых в ДЗ (геоинформационные системы, производственно-хозяйственная инфраструктура, сельское и лесное хозяйство, экология, мониторинг и контроль

чрезвычайных ситуаций и др.). Качество метрологического обеспечения этих измерений во многом определяет эффективность полученных данных средствами ДЗ, что нашло отражение в документе QA4EO “Стратегия обеспечения качества данных наблюдения Земли” (англ. Quality Assurance Framework for Earth Observation), разработанного в рамках проекта GEOSS по созданию международной глобальной системы наблюдения Земли [1 – 3]. Подходы, изложенные в этом документе, тесно связаны с основами обеспечения единства измерений:

- чёткое определение измеряемых величин, данное с достаточной полнотой и принятое всеми исполнителями измерений;
- выражение результатов измерений в законных единицах;
- прослеживаемость результатов измерений к первичному эталону;
- определение точностных характеристик результатов измерений по единой методике с условием, что они не выходят за установленные пределы с заданной вероятностью.

В настоящее время в Республике Беларусь метрологическое обеспечение спектрорадиометрических и радиометрических измерений, из-за отсутствия Национального эталона единиц спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) и освещенности (СПЭО) имеет фрагментарный характер. Имеющиеся в Беларуси установки и комплексы, прошедшие метрологическую аттестацию (БелГИМ, Институт физики НАН Беларуси, ИПФП имени А. Н. Севченко БГУ), в большинстве случаев позволяют обеспечить поверку (калибровку) средств измерений (СИ) спектрорадиометрических и радиометрических характеристик с неопределенностью не лучше 7%. Аккредитованные калибровочные и испытательные лаборатории в области оптической радиометрии (Института физики НАН Беларуси, ИПФП имени А. Н. Севченко БГУ, ООО «ТМ» и др.), а также большинство производителей спектральной и оптической техники (Белорусское оптико-механическое объединение (БелОМО), ОАО Пеленг, ПО «Горизонт», Рогачевский завод «Диaproектор», ЗАО «Солар ЛС» и др.) вынуждены обращаться за пределы страны, в частности во ВНИИОФИ (Россия) или РТВ (Германия), для метрологического обеспечения создаваемых и используемых СИ.

Учитывая необходимость разработки национальной эталонной базы Беларуси для спектрорадиометрической калибровки оптической аппаратуры в 2016 г. в рамках подпрограммы «Эталон Беларуси» ГНТП «Эталон и научные приборы» на 2016 – 2020 годы начаты работы по созданию Национального эталона единиц СПЭЯ, СПЭО и силы излучения в диапазоне длин волн от 0,2 до 3,0 мкм. Его основные метрологические характеристики следующие:

- диапазон воспроизведения СПЭЯ от  $1 \cdot 10^7$  до  $1 \cdot 10^{12}$  Вт·ср<sup>-1</sup>·м<sup>-3</sup> при стандартной неопределенности воспроизведения СПЭЯ не более 0,7 %;
- диапазон воспроизведения СПЭО от  $1 \cdot 10^2$  до  $1 \cdot 10^{10}$  Вт·м<sup>-3</sup> при стандартной неопределенности воспроизведения СПЭО не более 0,72 %;
- диапазон измерений СПЭО от  $1 \cdot 10^2$  до  $1 \cdot 10^{10}$  Вт·м<sup>-3</sup>;
- диапазон воспроизведения силы излучения от 3,5 до  $1 \cdot 10^2$  Вт·ср<sup>-1</sup>.

Состав эталона единиц СПЭЯ, СПЭО: комплекс СИ для воспроизведения единиц СПЭЯ излучения и создаваемой им СПЭО на базе модели эталонного высокотемпературного черного тела (МВЧТ); система для измерений СПЭЯ и СПЭО в УФ области спектра (УФ-система); система для калибровки широкоапертурных СИ.

Система для калибровки широкоапертурных СИ (широкоапертурного эталона) предназначена, в первую очередь, для калибровки приборов ДЗ. Схема широкоапертурного эталона приведена на рис. 1.

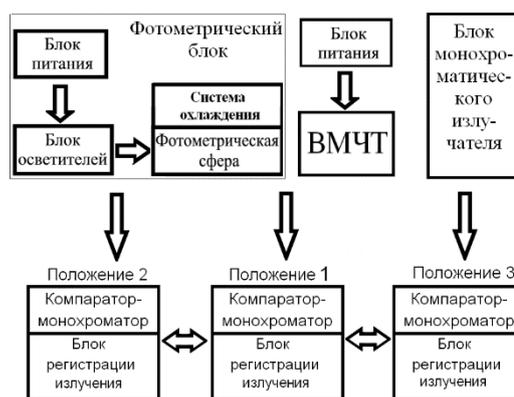


Рис. 1. Схема широкоапертурного эталона

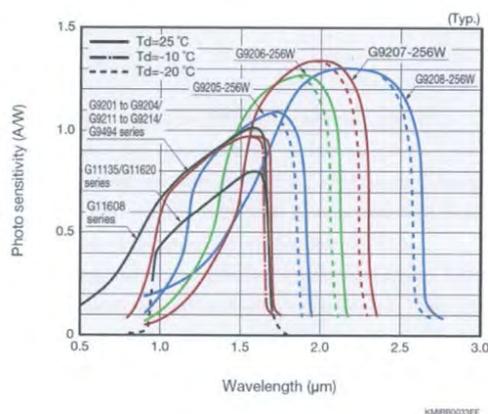


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность InGaAs-линеек Hamamatsu

Блок регистрации излучения системы для калибровки широкоапертурных СИ включает два регистратора. Регистратор оптического

излучения U2C-16H7136 (регистратор 1), который работает в спектральном диапазоне от 350 до 1050 нм и включает в себя светочувствительную камеру, сетевой блок питания, соединительные кабели и программное обеспечение, позволяющее управлять режимами работы датчика, синхронизацией внешних приборов и установок, производить визуализацию полученных экспериментальных результатов, а также экспортировать полученные файлы данных для их последующей обработки программными пакетами «Origin», «Matlab» и др. Обмен данными осуществляется по интерфейсу USB-2.0 порта. В качестве датчика используется охлаждаемая ПЗС-матрица S7031-1006S фирмы Hamamatsu. Камера работает в режиме аппаратного суммирования столбцов line binning, таким образом, регистрируются спектры, расположенные в виде одной горизонтальной полосы. Регистратор оптического излучения U2C-16G92087 (регистратор-2) работает в спектральном диапазоне от 1000 до 2500 нм. Фотодетектор регистратора 2 представляет собой InGaAs-линейку G9208-256W фирмы Hamamatsu. Как видно из рис. 2, на котором представлена относительная спектральная чувствительность InGaAs-линейки фирмы Hamamatsu, фотодиодная линейка G9208-256W в спектральном диапазоне длин волн от 1,0 до 2,5 мкм имеет достаточно высокую относительную спектральную чувстви-

тельность. На участке спектра вблизи 1,0 мкм значение относительной спектральной чувствительности более 0,2 A/W, максимум чувствительности (со значением  $1,2 \div 1,3$  A/W) приходится на диапазон длин волн от 1,8 до 2,5 мкм.

Создаваемый Национальный эталон единиц СПЭЯ, СПЭО и силы излучения будет являться основой национальной эталонной базы Беларуси для спектрометрической калибровки оптической аппаратуры, в том числе и аппаратуры ДЗ, позволит объединить эталонные средства и соответствующие поверочные схемы в единый радиометрический эталон с оптимизацией количества звеньев. Кроме того, для аккредитованных калибровочных и испытательных лабораторий в области оптической радиометрии, а также для большинства производителей оптоэлектронной и, особенно, спектральной техники отпадет необходимость получения метрологического обеспечения за пределами Беларуси, в частности во ВНИИОФИ (г. Москва, Россия).

1. Global Earth Observation System of Systems: GEOS 10-Year Implementation Plan Reference Document. Group on Earth Observations. GEO 1000. – 2005.
2. Метрологическое обеспечение радиометрических измерений оптической аппаратурой наблюдения земли / Панфилов А.С. [и др.] // Мир измерений. – 2011. – № 12. – С. 14–20.

УДК 004.588

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

**Матюш И.И., Спесивцева Ю.Б.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Производство различной технической продукции зачастую ориентировано на экспорт, поэтому при проведении метрологической экспертизы и нормоконтроля необходимо руководствоваться теми нормами, требованиями и правилами, которые актуальны для страны-импортёра данной продукции. Экспертная работа будет наиболее успешной если процессы ее подготовки и проведения будут максимально формализованы, поэтому надо стремиться к унификации элементов экспертизы и использовать возможности автоматизации (компьютерная поддержка, базы данных, специализированные программные продукты и т.д.). Формализация метрологической экспертизы и нормоконтроля, автоматизация их информационного обеспечения с учетом специфики объектов является актуальной задачей и реализует комплексный и системный подходы к этим видам работ.

При проведении всесторонней эффективной экспертизы, когда необходима высокая

квалификация эксперта как в области стандартизации и метрологии, так и области экспертируемого объекта возникает потребность в соответствующей базе знаний. Под знаниями понимается совокупность данных и информации, которая дополняется экспертным мнением, профессиональными навыками и опытом, в результате чего появляется ценный актив, который возможно применять для оказания помощи в принятии решений [1]. Менеджмент знаний должен включать в себя сохранение, классификацию, трансформацию, обеспечение доступности знаний, распространение и обмен знаний, в том числе в рамках организации [2].

Носителями знаний являются сотрудники организации, которые в силу различных обстоятельств, могут покинуть свое место работы, поэтому и с этой позиции целесообразно организовать документирование и систематизацию приобретённой полезной информации, а также обеспечить эффективное управление полученной системой. Таким образом

речь идет о системе знаний, как об объекте проектирования и о средстве, которое предоставляет возможность результативнее влиять на качество выпускаемой продукции и оказываемых услуг.

Созданный информационно-поисковый ресурс «SMIS» может успешно использоваться при формировании системы менеджмента знаний организации и особенно эффективно поддерживать экспертные виды работ. Он представляет собой открытую, редактируемую от лица пользователя систему, созданную для хранения и удобного поиска нужной информации. Система реализована в виде сайта (Окно главной страницы представлено на рисунке 1) с интуитивно понятным интерфейсом и предназначена для коллективного использования внутри организации сотрудниками, чьи рабочие места оснащены персональными компьютерами, объединенными в локальную сеть.

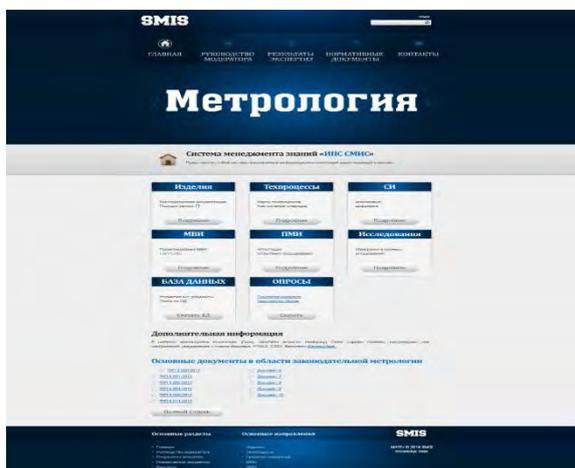


Рисунок 1 – Окно стартовой страницы «SMIS»

Внутри сайта в соответствующем разделе находятся обучающие видеоматериалы (рисунок 2), позволяющие любому сотруднику (пользователю) в очень короткие сроки овладеть навыками модератора данного комплекса и, как следствие, сэкономить денежные ресурсы организации не осуществляя поиск и не привлекая специалиста для этих целей со стороны.

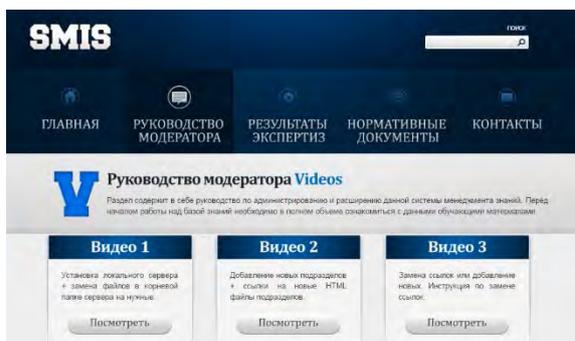


Рисунок 2 – Раздел с обучающими материалами

В «SMIS» предусмотрена возможность хранения и удобного поиска результатов выполнения различных рабочих заданий тем или иным сотрудником, что в последующем упрощает процесс решения схожих по специфике задач другими сотрудниками организации. Таким образом система способна накапливать и хранить знания, полученные ранее.

Каждый сотрудник (пользователь «SMIS») имеет постоянный открытый доступ к этим знаниям (рисунок 3).

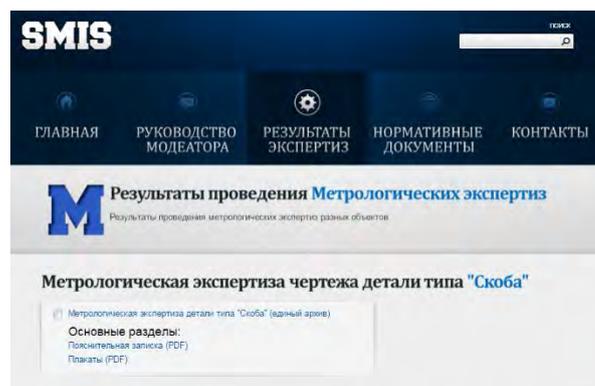


Рисунок 3 – Раздел для внесения и хранения новых материалов, а также поиска подходящих готовых решений, использованных ранее и уже внесенных в базу

Также у каждого из сотрудников есть возможность контроля собственных знаний в той или иной области деятельности организации. Тематические тесты могут быть созданы модератором при помощи редактора тестов, включенного в комплекс, и размещены в соответствующем разделе сайта (раздел «ОПРОСЫ», рисунок 1).

Таким образом, благодаря универсальности реализуемых методов и подходов «SMIS» может быть использована для систематизации, обеспечения удобства хранения, доступа и поиска нужной информации сотрудниками организаций осуществляющих свою деятельность в областях разного рода.

Помимо прочего, в частности с целью облегчить и ускорить поиск пользователем необходимых нормативных документов внутри «SMIS» реализована автоматизированная система поиска нормативно-технической документации (раздел «БАЗА ДАННЫХ», рисунок 1).

Данная система поиска представляет собой приложение, в основе которого лежит база данных, содержащая в себе информацию о различных национальных, региональных и международных нормативных документах, нормам, требованиям и правилам которых должна соответствовать экспортируемая в те или иные страны или регионы соответствующая продукция и представляющая данную продукцию документация (рисунок 4).

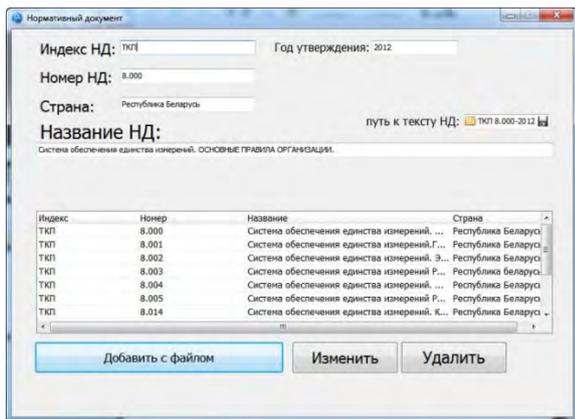


Рисунок 4 – Пример поиска нормативных документов в базе данных по индексу

Тот факт, что база данных должна содержать лишь актуальные на данный момент документы, учтён в данной системе в виде возможности пользовательского редактирования её содержимого (рисунок 4). На случай, если тексты искомым документов закрыты для общего доступа, предусмотрены ссылки на официальные интернет-ресурсы организаций-разработчиков, где, при необходимости, можно узнать условия их распространения.

На данный момент «SMIS» адаптирована под пользователей осуществляющих различные

работы в области метрологии и содержит такие разделы как «Изделия», «Техпроцессы», «СИ» (средства измерений), «МВИ» (методики выполнения измерений), «ПМИ» (программы и методики испытаний), «Исследования», «БАЗА ДАННЫХ», «ОПРОСЫ». Два последних рассмотрены выше. Остальные разделы предусмотрены для пополнения в перспективе.

Таким образом польза от «SMIS», функционирующей в рамках какого-либо предприятия в целом, или в рамках одного из его структурных подразделений (в частности метрологического отдела) является очевидной. Система проста в использовании, так как не требует для этого особых навыков, имеет легко пополняемую базу данных и способность расширения содержащегося внутри себя информационного пространства, объем которого ограничивается физическим объемом носителя цифровой памяти устройства, используемого для её хранения.

1. ГОСТ Р 54875-2011. Менеджмент знаний. Руководство по устоявшейся практике внедрения системы менеджмента знаний.
2. Гапоненко А. Л. Управление знаниями. – М.: ИПК Госслужбы, 2001.

**Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

УДК 534-16:534-8:621.9.048.6

**РАСЧЕТ КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПЕРЕДАТОЧНЫХ МАТРИЦ**

Степаненко Д.А., Емельянова А.С., Плескач М.А., Солодка Н.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Возможность усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде с помощью неоднородных кольцевых концентраторов, состоящих из нескольких последовательно соединенных сегментов из материалов с различной плотностью и/или модулем упругости, была ранее теоретически обоснована авторами [1, 2]. Преимуществами таких концентраторов являются простота изготовления, малые габаритные размеры и масса. Расчет основных эксплуатационных характеристик кольцевых концентраторов, таких как резонансные частоты колебаний и коэффициент усиления колебаний по амплитуде, может осуществляться путем решения дифференциальных уравнений их колебаний с учетом граничных условий [1, 2], однако такой подход является достаточно трудоемким. Более простым с инженерной точки зрения является расчет с помощью метода передаточных матриц, который ранее применялся авторами для стержневых концентраторов [3].

Передаточная матрица  $\mathbf{T}(\varphi)$  позволяет выразить вектор параметров колебаний  $\mathbf{u}(\varphi)$  в произвольно взятом поперечном сечении концентратора через вектор параметров колебаний  $\mathbf{u}(0)$  в его входном сечении:

$$\mathbf{u}(\varphi) = \mathbf{T}(\varphi)\mathbf{u}(0).$$

В случае изгибных колебаний кольцевого сегмента вектор параметров колебаний состоит из 6 переменных: амплитуда тангенциальных колебательных смещений  $V(\varphi)$ , амплитуда радиальных колебательных смещений  $W(\varphi)$ , амплитуда угла поворота поперечного сечения  $\psi(\varphi) = (1/R)(dW/d\varphi + V)$ , амплитуда продольной силы  $N(\varphi) = (ES/R)(dV/d\varphi - W)$ , амплитуда момента  $M(\varphi) = (EJ/R^2)(dV/d\varphi + d^2W/d\varphi^2)$ , амплитуда поперечной силы  $Q(\varphi) = -(EJ/R^3)(d^3W/d\varphi^3 + d^2V/d\varphi^2)$ . Здесь  $R$  – радиус средней линии сегмента,  $E$  – продольный модуль упругости материала сегмента,  $S$  – площадь поперечного сечения сегмента,  $J$  – осевой момент инерции поперечного сечения сегмента. Приведенные определения переменных даны для уравнений колебаний типа Эйлера-Бернулли, не учитывающих сдвиговых деформаций и инерционного момента, связанного с вращением попе-

речного сечения. При учете этих факторов (использовании уравнений колебаний типа Тимошенко) амплитуда угла поворота  $\psi$  становится независимой переменной, а амплитуды момента и поперечной силы определяются выражениями

$$M(\varphi) = (EJ/R)d\psi/d\varphi,$$

$$Q(\varphi) = (K_s GS/R)(dW/d\varphi + V - \psi R),$$

где  $K_s$  – коэффициент сдвига, зависящий от формы поперечного сечения сегмента,  $G$  – модуль сдвиговой упругости материала сегмента.

Для однородного кольцевого сегмента с  $S = \text{const}$  и  $R = \text{const}$  передаточную матрицу можно представить в виде

$$\mathbf{T}(\varphi) = \exp(\mathbf{A}\varphi),$$

где матрица  $\mathbf{A}$  входит в уравнение колебаний сегмента  $d\mathbf{u}/d\varphi = \mathbf{A}\mathbf{u}$ , записанное относительно вектора параметров колебаний, и в случае уравнений типа Эйлера-Бернулли имеет вид

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & R/ES & 0 & 0 \\ -1 & 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R/EJ & 0 \\ -EJ\xi/R^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R \\ 0 & -EJ\xi/R^3 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Здесь  $\xi = \omega^2 \rho SR^4 / EJ$  – безразмерный частотный параметр,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $\rho$  – плотность материала сегмента.

В случае уравнений типа Тимошенко в матрице  $\mathbf{A}$  добавляются два дополнительных ненулевых элемента:  $A_{26} = R/K_s GS$  и  $A_{53} = -EJ^2\xi/SR^3$ .

С помощью теоремы о спектральном разложении (формулы Лагранжа-Сильвестра) передаточную матрицу можно представить в виде

$$\mathbf{T}(\varphi) = \sum_{k=1}^6 \exp(\lambda_k \varphi) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^6 \frac{\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I}}{\lambda_k - \lambda_i},$$

где  $\lambda_k$  – собственные числа матрицы  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Передаточная матрица концентратора, состоящего из двух сегментов с центральными углами  $2\varphi_0$  и  $2(\pi - \varphi_0)$ , будет определяться как

произведение передаточных матриц составляющих его сегментов:

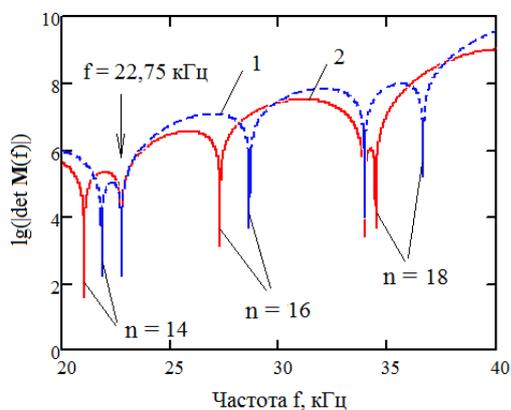
$$\mathbf{T}(\mathbf{g}, f) = \mathbf{T}_2(\mathbf{g}_2, f, \pi - \varphi_0) \mathbf{T}_1(\mathbf{g}_1, f, \varphi_0),$$

где  $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2$  – векторы геометрических параметров сегментов,  $\mathbf{g}$  – вектор геометрических параметров концентратора,  $f$  – частота колебаний.

При заданном значении вектора  $\mathbf{g}$  геометрических параметров концентратора (задача расчета концентратора) резонансные частоты колебаний могут быть определены из условия резонанса

$$\det \begin{pmatrix} T_{12}(\mathbf{g}, f) & T_{14}(\mathbf{g}, f) & T_{15}(\mathbf{g}, f) \\ T_{32}(\mathbf{g}, f) & T_{34}(\mathbf{g}, f) & T_{35}(\mathbf{g}, f) \\ T_{62}(\mathbf{g}, f) & T_{64}(\mathbf{g}, f) & T_{65}(\mathbf{g}, f) \end{pmatrix} = 0$$

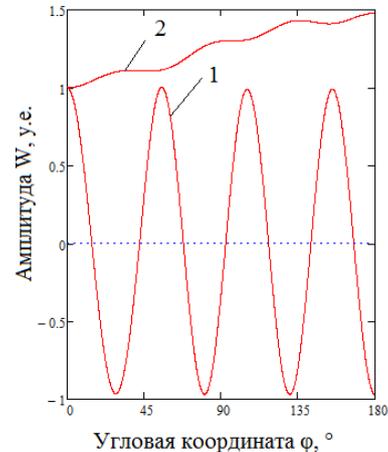
В качестве численного примера был рассмотрен расчет концентратора со следующими параметрами: радиус средней линии  $R = 29$  мм; толщина в радиальном направлении  $h = 2$  мм; модули упругости материалов сегментов  $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па (сталь),  $E_2 = 1,3 \cdot 10^{11}$  Па (бронза); плотности материалов сегментов  $\rho_1 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 8300$  кг/м<sup>3</sup>; центральный угол стального сегмента  $2\varphi_0 = \pi/2$ . Были рассмотрены частоты колебаний  $f$  в диапазоне от 20 до 40 кГц. На рисунке 1 приведены расчетные резонансные кривые концентратора, представляющие собой графики зависимости  $\lg(|\det \mathbf{M}(f)|)$ , где  $\mathbf{M}(f)$  – матрица, входящая в условие резонанса, от частоты  $f$ .



1 – расчет по уравнениям типа Эйлера-Бернулли,  
2 – расчет по уравнениям типа Тимошенко  
Рисунок 1 – Расчетные резонансные кривые  
кольцевого концентратора

Резонансным частотам соответствуют точки, в которых  $\lg(|\det \mathbf{M}(f)|) \rightarrow -\infty$ . Резонансные кривые, рассчитанные с использованием различных уравнений колебаний, имеют качественно сходный внешний вид, однако более точные значения резонансных частот получаются при использовании уравнений типа Тимошенко. Расчет собственных форм (мод) колебаний показывает, что их можно разделить на два типа

(рисунок 2): 1) моды со знакопеременной амплитудой  $W$ ; 2) моды со знакопостоянной амплитудой  $W$ . При этом усиление колебаний по амплитуде обеспечивают только моды второго типа. На рисунке 1 число узловых точек амплитуды  $W$  для мод со знакопеременной амплитудой обозначено как  $n$ .



1 –  $f = 21,03$  кГц, 2 –  $f = 22,75$  кГц,  
Рисунок 2 – Расчетные собственные формы  
колебаний кольцевого концентратора

Резонансные кривые и собственные формы колебаний, рассчитанные методом передаточных матриц с использованием уравнений типа Эйлера-Бернулли, с высокой точностью совпадают с резонансными кривыми и собственными формами, рассчитанными путем прямого решения дифференциальных уравнений колебаний [1, 2], что подтверждает корректность полученных результатов.

Таким образом, метод передаточных матриц позволяет производить простые инженерные расчеты кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний и определять резонансные частоты, на которых возникают моды со знакопостоянной амплитудой, обеспечивающие усиление колебаний по амплитуде.

1. Степаненко, Д.А. Усиление ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых концентраторов / Д.А. Степаненко // Международная научная конференция «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы»: материалы конференции. – Витебск, 2016. – С. 140–142.
2. Теоретическое обоснование возможности усиления ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко [и др.] // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2017, 2. – 13 с.
3. Исследование продольных колебаний гибких ультразвуковых волноводов с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 71–75.

УДК 538.2; 620.179.14

## НОВЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА СТАЛЕЙ В ПРИБОРАХ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Сандомирский С.Г.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Чувствительными к фазовому составу и структурному состоянию сталей являются их намагниченность  $M_s$  технического насыщения, остаточная намагниченность  $M_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$  предельной петли магнитного гистерезиса. Относительная погрешность  $\delta$  измерения по методикам ГОСТа:  $H_c - \pm 2\%$ ,  $M_r$  и  $M_s - \pm 3\%$ , а отношения  $K_{II} = M_r/M_s$  при измерении  $M_r$  и  $M_s$  на одной аппаратуре  $- \pm 1\%$ .

Но установилось мнение, что результатов измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  не достаточно для решения ряда задач магнитной структуроскопии. Одной из таких задач считают контроль качества высокотемпературного отпуска среднеуглеродистых легированных сталей. Многообразие сталей и режимов их обработок предопределило использование для структуроскопии максимальной  $\mu_m$  и начальной  $\mu_a$  магнитных проницаемостей, релаксационных намагниченности  $M_{Hr}$  и восприимчивости  $\chi_r$ , намагниченности  $M_{rc}$  коэрцитивного возврата и др. Часто их чувствительности к изменениям структуры сталей высоки и отличны от чувствительности к ее изменениям параметров  $H_c$  и  $M_r$ . Некоторые ученые выразили сомнения в целесообразности использования  $M_r$  сталей для их магнитной структуроскопии.

Но методики измерения  $\mu_m$ ,  $\mu_a$ ,  $M_{Hr}$ ,  $M_{rc}$  и  $\chi_r$  сложны и не всегда регламентированы ГОСТом, а  $\delta$  измерения больше, чем у  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ . Это усложняет и снижает достоверность магнитной структуроскопии сталей.

Для формирования магнитных параметров, обладающих высокой чувствительностью к изменениям структуры стали, простотой и точностью измерения, из  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  его предельной петли гистерезиса воспользуемся разработанными формулами для расчета  $\mu_m$ ,  $\mu_a$ ,  $M_{Hr}$ ,  $M_{rc}$  и  $\chi_r$  по результатам измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  [1 – 3], которые обобщены в [4]:

$$\mu_m \approx [0,5 + 0,00006H_c - (0,000068H_c)^2] \frac{M_r}{H_c},$$

$$\mu_a \approx \frac{[0,5 + 0,067H_c - (0,0687H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75H_c}) H_c},$$

$$M_{Hr} \approx 4M_r(1 - K_{II})^2/3, \quad M_{rc} \approx 1,23M_r(1 - K_{II})^2,$$

$$\chi_r \approx M_r(1 - K_{II})^{1,82}/H_c. \quad (1)$$

Формулы (1) описывают результаты измерения  $\mu_m$ ,  $\mu_a$ ,  $M_{Hr}$ ,  $M_{rc}$  и  $\chi_r$  с погрешностью, не более суммы  $\delta$  измерения входящих в (1) параметров. Анализ зависимостей (1) позволил, в дополнение к  $H_c$  и  $M_r$ , сформировать из параметров предельной петли гистерезиса параметры, чувствительные к изменениям структуры сталей:

$$F_1 = M_r/H_c \quad \text{и} \quad F_1 = M_r(1 - K_{II})^2. \quad (2)$$

На рисунках, как пример, сопоставлено влияние температур  $T_3$  закалки (рис.1) и  $T_0$  отпуска (рис.2) стали 38ХНМ на измеренные в [5, табл.21.1, 21.2]  $\mu_m$ ,  $M_{Hr}$  и рассчитанные по (2) параметры  $F_1$  и  $F_2$  этой стали.

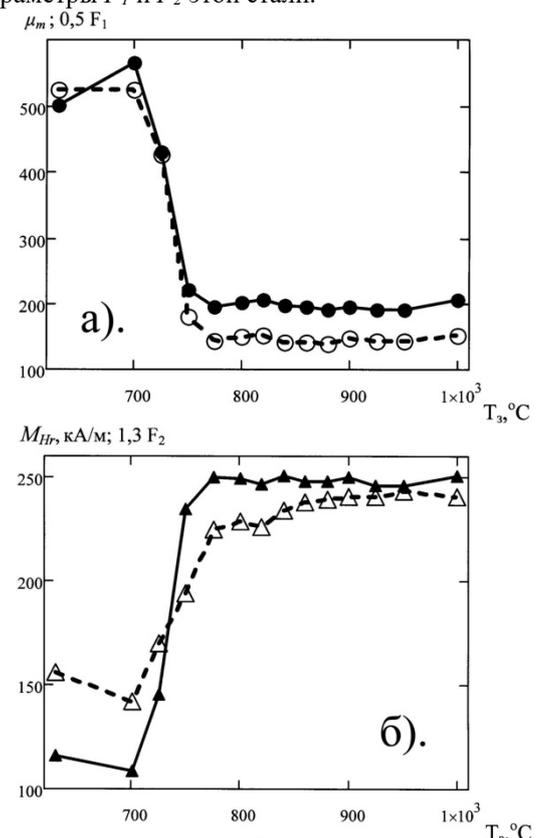


Рисунок 1 – Влияние  $T_3$  стали 38ХНМ на результаты измерения  $\mu_m$  (а, ●),  $M_{Hr}$  (б, ▲) и расчета  $F_1$  (а, ○),  $F_2$  (б, Δ) этой стали

Результаты (рисунки 1а, 2а) показывают, что зависимости  $\mu_m(T_0)$  и  $0,5F_1(T_0)$  стали 38ХНМ практически совпадают. Относительные погрешности  $\delta$  измерения  $\mu_m$  и расчета  $F_1$  равны,

но  $H_c$  и  $M_r$  по ГОСТу могут быть измерены на порядок проще, чем  $\mu_m$ .

Зависимости  $M_{Hr}(T_0)$  и  $1,3F_2(T_0)$  стали 38ХНМ также совпадают с точностью до погрешностей эксперимента (рис.1б, 2б). Но  $\delta$  расчета  $F_2$  по результатам измерения  $M_r$  и  $K_{II}$  вдвое меньше заявленной  $\delta$  измерения  $M_{Hr}$  (по ГОСТу методика и  $\delta$  измерения  $M_{Hr}$  не регламентированы, а ее измерение «не поддается автоматизации»).

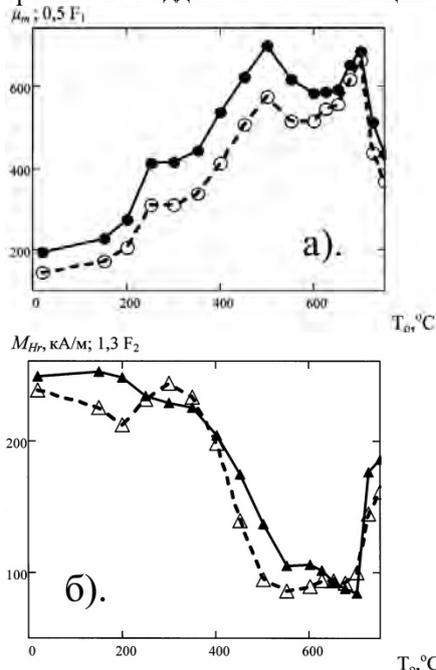


Рисунок 2 – Влияние  $T_0$  стали 38ХНМ после закалки от 860°C на результаты измерения  $\mu_m$ (а, ●),  $M_{Hr}$ (б, ▲) и расчета  $F_1$ (а, ○),  $F_2$ (б, △) этой стали

В магнитной структуроскопии параметры  $F_1$  и  $F_2$ , рассчитанные по (2) по результатам измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ , могут быть использованы и в разных комбинациях друг с другом и с  $H_c$  и  $M_r$ .

Предложенный подход позволяет при разработке приборов магнитной структуроскопии

изделий в замкнутой магнитной цепи сосредоточить усилия на повышении точности измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  материала изделий и отказаться от сложных и не точных измерений других магнитных параметров. Любой необходимый магнитный параметр материала изделий или любая их комбинация, могут быть синтезированы из результатов измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  с погрешностью, не более суммы погрешностей измерения параметров  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ .

Все эти параметры могут быть рассчитаны по разработанным формулам (1) или упрощенным алгоритмам (2).

#### Литература

1. Сандомирский, С.Г. Структурная чувствительность максимальной магнитной проницаемости. Ч. 1. Статистический анализ связи максимальной магнитной проницаемости сталей с параметрами петли гистерезиса / С.Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12 (186). – С. 33–38.
2. Сандомирский, С.Г. Анализ структурной чувствительности начальной магнитной проницаемости сталей / С.Г. Сандомирский // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 6. – С. 29 – 33.
3. Сандомирский, С.Г. Возможности и ограничения использования измерений релаксационных магнитных параметров сталей в магнитном структурном анализе (обзор) / С.Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 4. – С. 5–12.
4. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
5. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.

УДК 621.793.7

### РАСХОДНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ДЕТАЛИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Данько К.А., Долматов А.И.

Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина

Необходимость и целесообразность сочетания в деталях АД твердого, прочного, износостойкого и жаропрочного поверхностного слоя с пластичной, вязкой, устойчивой к образованию трещин и недорогой основой служит одной из причин увеличения популярности методов

газотермического напыления в аэрокосмической отрасли по всему миру.

Газотермическое напыление считается одной из наиболее перспективных технологий с точки зрения технологических возможностей и экологии. Мировой рынок, включающий доходы от материалов, оборудования и напыления покрытий в 2015 г оценивался экспертами в 7.58 миллиардов

долларов США, а к 2021 г ожидается его рост до 11.44 (MarketsandMarkets™)...11.89 (Mordor Intelligence) миллиардов долларов США, в т.ч. и за счет возрастающих потребностей в авиатранспорте [1].

По данным [2], в промышленном применении технологий газотермического напыления в Европе, доля, приходящаяся на аэрокосмическую отрасль, составляет более 28%.

Кроме того, анализ распространенных в современной промышленности методов напыления показал, что методы газотермического напыления обладают наибольшими технологическими возможностями с точки зрения номенклатуры напыляемых материалов. Согласно данным о характерных неисправностях деталей авиационных двигателей [3, 4], наибольшее внимания, с точки зрения защиты и восстановления, на сегодняшний день заслуживают детали горячего тракта, изготавливаемые из жаропрочных сталей и сплавов.

Цель данного исследования состоит в увеличении жизненного цикла деталей авиационных двигателей за счет газотермических покрытий, наносимых методом высокоскоростного газопламенного напыления на оборудовании, реализующем своей конструкцией расходный метод управления энергетическими параметрами напыляемых частиц. Для достижения поставленной цели, необходимо доработать расходный метод управления энергетическими параметрами напыляемых частиц, спроектировать горелку, реализующую в своей конструкции усовершенствованный расходный метод, разработать математическую модель процесса ускорения и нагрева частиц и опытно-теоретическим путем определить рациональные параметры покрытий, наносимых на выбранный материал подложки.

Расходный метод управления энергетическими параметрами частиц напыляемого материала при сверхзвуковом газопламенном напылении получил дальнейшее развитие на основании результатов патентно-конъюнктурного исследования соответствующих способов и оборудования.

Спроектирована и запатентована [5] горелка реализующая расходный метод управления энергетическими параметрами частиц; изготовлен промышленный образец разработанной горелки.

Разработана математическая модель [6, 7], позволяющая оценить изменения скорости и температуры частиц материала, напыляемого двухкамерной горелкой. С использованием разработанной математической модели получены графики изменения скорости и температуры напыляемых частиц композиционного порошка КХН-30 (70% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> + 30% (Ni-Cr 70/20)) размером 40 мкм на подложку из жаропрочного сплава Инконель 718. Исходя из графиков, температура частиц достигала 2500 К, а их скорость – 900 м/с при давлении во внутренней камере сгорания 0,3 МПа, в наружной камере сгорания 0,5 МПа. В качестве горючего использован МАФ-газ, в качестве окислителя – кислород с разными для двух камер сгорания коэффициентами избытка окислителя [8]. Инконель 718 был выбран в качестве материала подложки не случайно. Уже продолжительное время предприятиями Украины проводятся мероприятия по импортозамещению и поиску альтернативных поставщиков стратегически важных материалов и комплектующих. Семейство сплавов Инконель, компании Special Metals Corporation было выбрано как один из возможных вариантов замены существующих на сегодняшний день жаропрочных сплавов типа ХН60Ю (ЭИ 559А), применяемых для высокооборотных деталей авиационных двигателей, работающих при высоких температурах.

Выполненное численное моделирование процесса в системе ANSYS 15.0 и проведенные испытания подтверждают предположения об эффективности предлагаемого метода.

Проведен эксперимент по напылению порошка КХН-30 (70% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>+30% (Ni-Cr 70/20)) на подложку из Инконель 718 (рисунок 1, таблица 1) и выполнены комплексные исследования физико-химических свойств системы основание-покрытие, включающие оценку распределения легирующих элементов в образцах, выполненную на сканирующем электронном микроскопе "Cam Scan" с рентгеновским энергодисперсионным анализатором, определение микротвердости и пористости полученных покрытий. Кроме того, были измерены адгезионная и когезионная прочности покрытия [8].

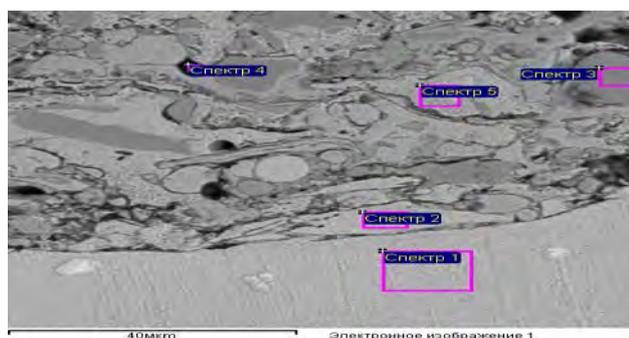


Рисунок 1 – Результаты исследования образца с покрытием

Таблица 1 – Распределение легирующих элементов в образце с покрытием

Спектр	C	O	F	Al	S	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Спектр 1	8.2		2.6	0.4		0.9	17.5	17.2	47.0	5.9
Спектр 2	7.8		2.5	0.5	0.5	0.8	17.7	17.0	46.5	6.4
Спектр 3	16.						82.9		0.95	
Спектр 4	68.	6.9					11.5	1.72	11.8	
Спектр 5	14.	1.4					14.9		68.9	

Полученные результаты позволяют с уверенностью утверждать об эффективности предложенной двухкамерной схемы горелки для сверхзвукового газопламенного напыления, позволяющей расширить технологические возможности оборудования за счет более широкого диапазона температур и лучших условий для релаксации частиц напыляемых материалов.

На основании проведенных исследований, разработаны технологические рекомендации по использованию предложенного оборудования для напыления покрытий из композиционных порошков типа КХН-30 на подложку из жаропрочных сплавов типа Инконель 718.

#### Литература

1. Vardelle, A. The 2016 Thermal Spray Roadmap/ Armelle Vardelle, Christian Moreau, Jun Akedo et al. // Journal of Thermal Spray Technology, Volume 25(8) – December 2016 – pp. 1376–1440.
2. Fauchais, P. L. Thermal Spray Fundamentals From Powder to Part / Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos (auth.)// Springer Science+Business Media New York, 2014–1566 pp;
3. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.

4. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

5. Пат. Украины 90044, МПК (2006) B05B 7/00. Газополуменевый паяльник для надзвукового напыления покрытий / Долматов А.И., Зорик И.В., Данько К.А.; Заявитель и патентообладатель Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – № а200809654; заявл. 25.01.2010, бюл. № 2; опубл. 25.03.2010, бюл. № 6. – 6 с.: ил.

6. Данько, К. А. Моделирование течения газа внутри тракта двухкамерной горелки для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий [Текст] / К. А. Данько // Вестник двигателестроения. – 2017. – № 1. – С. 130–138.

7. Данько, К. А. Моделирование процессов изменения скорости и температуры частиц  $Cr_3C_2$  при сверхзвуковом газопламенном напылении покрытий двухкамерной горелкой [Текст] / К. А. Данько // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 4. – С. 76–82.

8. Данько К.А. Исследование свойств покрытий, полученных сверхзвуковым газопламенным напылением с использованием двухкамерной горелки / К.А. Данько, А. И. Долматов, В. Н. Лопата // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 8. – С. 75–84.

УДК 621.315.592

## ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ $SiSi_xN_ySi$

Францкевич Н.В., Францкевич А.В., Шеденков С.И.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Предложено множество технологий по формированию структур кремний на изоляторе. В работах [1,2] описан метод формирования изолирующей структуры  $SiSi_xO_ySi$  в результате геттерирования кислорода, вводимых в кремний из DC плазмы, на предварительно созданный глубокий дефектный слой. Естественным образом встал вопрос о возможности формирования структуры  $SiSi_xN_ySi$ .

Стандартные пластины Cz кремния n-типа 20  $\Omega$ -cm имплантировались ионами водорода при комнатной температуре с энергией 100 кэВ и дозой  $4 \cdot 10^{16}$  (образец 1) и  $1 \cdot 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup> (образец 2).

Расчетное значение проективного пробега  $R_p$ , имплантированных ионов составляет 0,9 мкм. После этого, в указанные выше пластины кремния, а так же исходную не имплантированную пластину, вводился азот из DC плазмы при температуре не превышающей 300 °С. После этого, все образцы отжигались при 700 °С в вакууме в течении двух часов.

Контроль распределения азота по глубине кремниевой пластины проводился методом вторичной ион-масс спектроскопии (ВИМС), с использованием установки CAMECA IMS-4F ( $Cs^+$  source, 10 кэВ). Распыляемая область

составляла  $250 \cdot 250$  мкм<sup>2</sup>, вторичные ионы анализировались из центральной области диаметром 10 мкм. Визуализация глубинных электрически активных областей проводилась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), в режиме электронно индуцированного поверхностного потенциала (SEBIV) [3].

На рисунке 1(а) представлены результаты ВИМС полученные с образца кремния предварительно имплантированного водородом дозой  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и обработанного в плазме азота. На рис. 1 (б, с, д) представлен образ поверхности пластины кремния полученный с использованием метода СЭМ, снятый с областей содержащих кратеры ионного травления полученные при проведении исследований ВИМС. Для сравнения, на рис. 2 приведены результаты ВИМС, и СЭМ образ кратера травления, полученные с образца кремния имплантированного водородом дозой  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. В соответствии с данными профилометрии, глубина кратера травления для всех образцов составляет около 2,2 мкм.

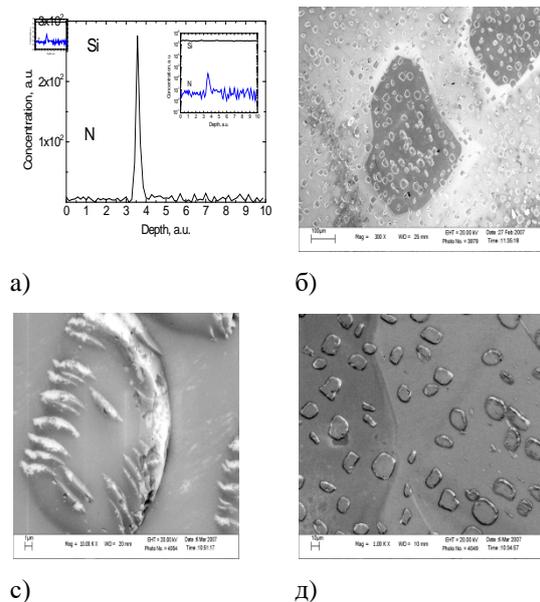
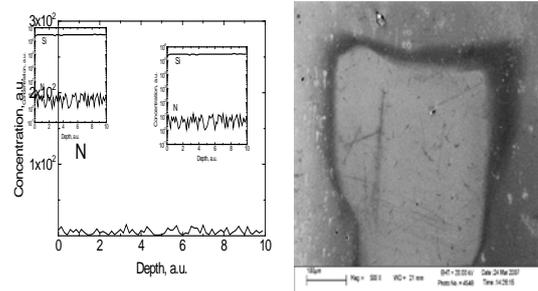


Рисунок 1 (а, б, с, д) – Результаты ВИМС (а) и СЭМ (б, с, д) для образца 1. СЭМ образ – общий вид кратера (1б), граница раздела травленной (слева) и не травленной (справа) областей (1, с), образование кремний на нитриде кремния расположенное в кратере (1, д). На вставке рис. 1а данные ВИМС приведены в логарифмическом масштабе

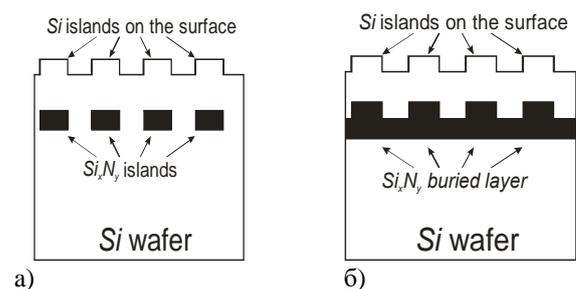
Как видно из данных ВИМС, представленных на рисунке 1, а, для пластины кремния имплантированной водородом  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и обработанной в плазме азота, наблюдается аккумуляция азота, с концентрацией как минимум в два раза превышающей фон, в области  $R_p$  предварительно имплантированного водорода. Фоновая концентрация азота в области между

поверхностью и положением пика на глубине  $R_p$ , практически эквивалентна концентрации азота в объеме кремниевой пластины.



а) Рисунок 2 – ВИМС профиль (1,а) и образ поверхности СЭМ кратера травления (2, б) для образца 2. На вставке рис. 2, а данные SIMS приведены в логарифмическом масштабе

В соответствии с данными профилометрии, на поверхности образца 1 детектируется рельефная структура с высотой выступов до 100 нм. Форма, размер и периодичность расположения видны из данных СЭМ, представленных на рисунке 1 б, с, д. Как видно из данных СЭМ, представленных на рисунке 1 б, с, островковая структура наблюдается так же в кратерах травления, образовавшихся в результате исследований ВИМС. Возможное объяснение полученного результата состоит в следующем. Наблюдаемая на поверхности островковая структура сформировалась в результате развития неоднородного по толщине глубинного слоя. Развитие глубинного слоя в результате отжига может происходить по двум вариантам, образуются только крупные островки дефектов (рисунок 3, а) или же наряду с крупными дефектами формируется и ряд мелких глубинных (рисунок 3, б), которые формируют псевдо сплошной слой.

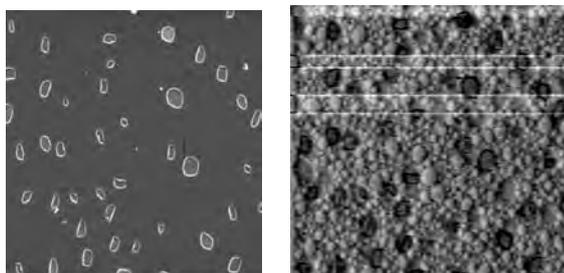


а) Рисунок 3 – Модельное представление образования островкового слоя на поверхности и в объеме кремниевой пластины

Известно, что количество геттеризируемой примеси пропорционально количеству дефектов, следовательно, профиль распределения азота должен качественно повторять профиль распределения дефектов. Следовательно, синтезированная структура должна иметь вид, представленный на рисунке 3, а либо 3, б.

В ВИМС исследованиях, в результате ионного распыления преимущественно будет распыляться те области кремния, с которых быстрее стекает заряд, т.е. под которыми диэлектрика нет, или его толщина меньше по сравнению с окружающими областями. Независимо от того, какой из моделей (рисунок 3 а,б) соответствует структура глубинного слоя, присутствие островков в кратере травления объясняется наличием слоя с изолирующими свойствами под слоем кремния.

Для ответа на вопрос, какой из представленных на рисунке 3 моделей соответствует синтезированный глубинный  $\text{Si}_x\text{N}_y$  слой, проводились исследованиями СЭМ в режиме SEBIV, результаты представлены на рисунке 4 а,б.



а)

б)

Рисунок 4 – Образ поверхности образца 1, во вторичных электронах, и в режиме поверхностно индуцированного потенциала

Как видно из представленных на рисунке 4, б данных, структура buried layer представляет

собой островковые образования, однако большая их часть в отличие от островков проявившихся на поверхности, имеет значительно меньшие размеры – 2–3 мкм.

По совокупности представленных данных получаем:

- в области предварительно созданных радиационных дефектов геттерится азот;
- диффузия и геттерирование азота происходит при температурах не выше 700 °С, хотя образование островковой структуры непосредственно после плазменной обработки при 300 °С, может указывает на то, что данный процесс происходит при более низкой температуре.

Отжиг при 700 °С приводит к изменению электрических свойств buried layer, что обусловлено вероятнее всего образованием нитрида кремния. Структура buried layer соответствует представленной на рисунке 3(б).

#### Литература

1. A.V. Franzkevich, Anis M.H. Saad, A.V. Mazanik, A.K. Fedotov, E.I. Rau, S.V. Chigir // Solid State Phenomena, V. 95-96 (2004). P. 571-576.
2. A.V. Frantskevich, A.K. Fedotov, N.V. Frantskevich, A.V. Mazanik, E.I. Rau, V.S.Kulinkayskas // Material Science and Engineering B, Vols. B124-125 (2005). P. 341-344.
3. E.I. Rau, A.N. Zhukov and E.B. Yakimov // Inst. Phys. Conf. Ser. No 160 (1997), p. 75.

УДК 621.315.592

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ВОДОРОДА ИЛИ ГЕЛИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

**Францкевич Н.В., Францкевич А.В., Шеденков С.И.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В работах [1] изучалась возможность создания глубинного изолирующего слоя в пластинах монокристаллического кремния, в результате геттерирования азота или кислорода, вводимых в кремний из DC плазмы, на предварительно созданный глубинный дефектный слой. Формирование глубинного дефектного слоя происходило в результате предварительной имплантации водорода дозами  $(2-4) \times 10^{16}$  ат./см, и последующего отжига. Эффект геттерирования разного рода примесей на дефектах, в том числе и радиационных, достаточно изученное явление и имеет практические применения. Однако, на момент начала исследований, неисследованной областью была возможность управляемого развития предварительно созданного дефектного

слоя дозами имплантации менее  $1 \times 10^{16}$  ат./см. водорода или гелия. Дальнейшее развитие слоя планировалось в результате геттерирования на нем водорода или гелия, вводимых из плазмы, и последующих отжигов, при определенных температурах и соответствующей длительности. Такой подход мог удешевить предложенный в [1,2] метод создания структур кремний на изоляторе. В ходе проведения соответствующих исследований, было обнаружено, что при определенных режимах обработки, на поверхности пластин происходит образование конических структур, которые могут иметь самостоятельное практическое применение. Главная цель данной работы – представление экспериментальных данных позволяющих сравнить условия формирования поверхностных

структур, возникающих на поверхности пластин кремния после плазменной водородной обработки, в случае их предварительной имплантации водородом или гелием.

Стандартные пластины Cz кремния n-типа  $4.5 \text{ } \Omega\text{-cm}$  имплантировались ионами водорода при комнатной температуре с энергией 100 кэВ и дозой  $1 \cdot 10^{15}$ ,  $5 \cdot 10^{15}$ ,  $1 \cdot 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup>.  $R_p$  имплантированных ионов составляет 0,9 мкм. После этого, водород вводился в кремний из DC плазмы при 250 или 300°C. Энергия ионов во время плазменной обработки составляла 2 кэВ, длительность обработки 30 минут при плотности тока 3 мкА/см<sup>2</sup>. Одновременно с имплантированными образцами обрабатывались, контрольные, не имплантированные. Поскольку изменения поверхности после плазменной обработки не наблюдалось, данные результаты не приводятся. Спектры комбинационного рассеяния снимались при комнатной температуре на микроспектрометре с использованием  $\text{Ar}^+$  лазера с длиной волны 488 нм и выходной мощностью 20 мВт. Лазерное излучение фокусировалось на образце с использованием микроскопа (увеличением  $\times 100$ ). Рассеянный сигнал анализировался с использованием дифракционной решетки ( $1800 \text{ mm}^{-1}$ ) и охлаждаемой ПЗС матрицы. Изучение поверхности проводилось при помощи оптического микроскопа.

На рисунке 1 (а, б, в) представлен образ поверхности пластин кремния полученный с помощью оптического микроскопа, с образцов имплантированных водородом с энергией 100 кэВ и дозой  $1 \cdot 10^{15}$ ,  $5 \cdot 10^{15}$ ,  $1 \cdot 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup> и обработанных в плазме водорода при 250 °С.

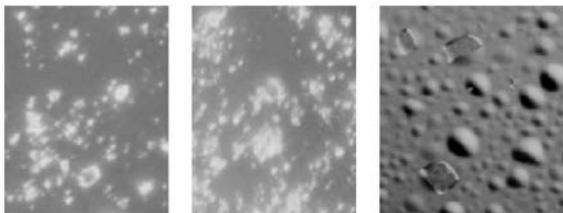


Рисунок 1 – Образ поверхности, полученный в оптическом микроскопе для образцов кремния  $4.5 \text{ } \Omega\text{cm}$ , имплантированных водородом дозами 0,1, 0,5 и  $1 \times 10^{16}$ , и обработанных в плазме водорода при 250 °С

Как видно из представленных данных, имплантация дозой  $1 \times 10^{16}$  и плазменная обработка приводит к блистеренгу на поверхности пластины который наблюдается обычно после имплантации водорода дозами выше  $4 \times 10^{16}$  и отжига при температурах выше 400 °С.

Согласно существующей теории блистеринга, образование водородной молекулы в материалах содержащих порядка 7-10 % водорода, приводит к их механическому разрушению, т. е. блистерингу. Одним из методов позволяющих идентифицировать

молекулярный водород, в том числе локализованный в кремнии, является метод комбинационного рассеяния. Кроме этого, Рамановский сдвиг основной линии кремния или изменение ее формы позволяет детектировать присутствие аморфного, поликристаллического кремния или наличие растягивающих/сжимающих напряжений [2].

Результаты комбинационного рассеяния для пластин кремния, обработанных в плазме водорода при 250°C, представлены на рисунке 2.

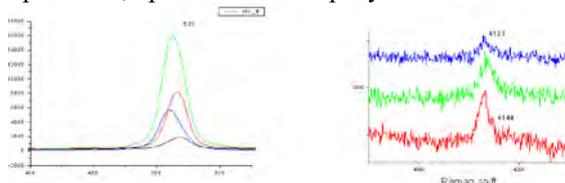


Рисунок 2 – Спектры комбинационного рассеяния от образцов Cz Si имплантированных водородом дозами 0,1, 0,5,  $1 \times 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup> и обработанных в плазме водорода при 250 °С. Спектральный диапазон соответствует основной линии кремния (слева), водородной молекулы – справа

Как видно из представленных данных, с увеличением дозы предимплантированного водорода происходит смещение основной линии кремния в сторону больших длин волн, свидетельствующее о аморфизации поверхности образцов. Для водородной молекулы с увеличением дозы имплантации интенсивность пика уменьшается. С увеличением степени аморфизации поверхности образца количество молекулярного водорода уменьшается, что вполне закономерно.

Образцы кремния обработанные в плазме водорода при 300°C. так же исследовались в оптическом микроскопе, и методом комбинационного рассеяния. Исследование в оптическом микроскопе не выявило значительных различий по сравнению с образцами, обработанными при 250 °С, для аналогичных доз пред имплантированного водорода. В то же время, на данных комбинационного рассеяния, представленных на рисунке 3, есть заметные отличия.

Если вклад линии от бездефектного кремния ( $521 \text{ cm}^{-1}$ ), практически не зависит от дозы имплантации, то вклад от дефектных областей с напряжениями сжатия ( $527 \text{ cm}^{-1}$ ), увеличивается с увеличением дозы пред имплантированного водорода.

Одновременно с образцами, имплантированными водородом, в плазме водорода обрабатывались стандартные пластины Cz кремния n-типа  $4,5 \text{ Mcm}$  имплантированных ионами гелия при комнатной температуре с энергией 300 кэВ,  $R_p = 2 \text{ мкм}$ , дозами  $1 \cdot 10^{15}$ ,  $5 \cdot 10^{15}$ ,  $1 \cdot 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup> и отожженными в вакууме при температуре 800 °С в течение 1 часа.

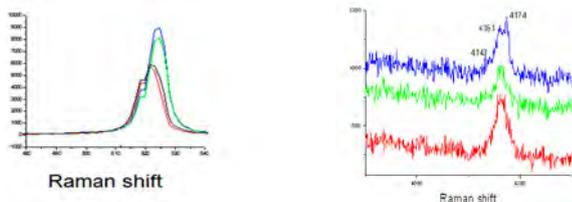


Рисунок 3 – Спектры комбинационного рассеяния от образцов Cz Si имплантированных водородом дозами 0.1,  $0.5 \times 10^{16}$  и  $1 \times 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup> и обработанных в плазме водорода при 300 °С.

На рисунке 4 представлены данные СЭМ, полученные с поверхности образца кремния, имплантированного гелием дозой  $5 \cdot 10^{15}$  ат/см<sup>2</sup> и обработанных в плазме водорода при 300 °С.

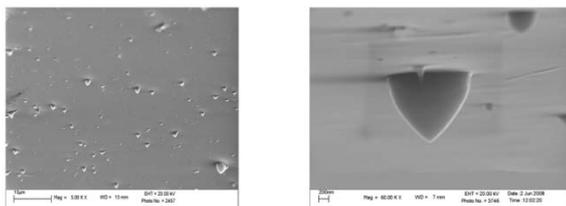


Рисунок 4 – Образ СЭМ поверхности образца кремния, содержащего массив образований и одиночное коническое образование.

Как видно из рисунка 4, на поверхности кремниевой пластины, после соответствующих

обработок, формируется массив конических поверхностных образований.

Данные комбинационного рассеяния, представлены на рисунке 5.

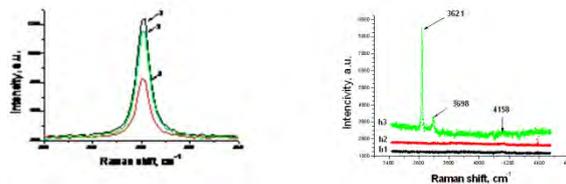


Рисунок 5 – Данные комбинационного рассеяния в спектральном диапазоне, соответствующем основной линии кремния (слева) и положению водородной молекулы в решетке кремния (справа)

Из представленных данных видно, что конические образования не имеют напряжений растяжения/сжатия, и сигнал сопоставляемый водородной молекуле, не наблюдается.

#### Литература

1. N.V. Frantskevich, A.V. Frantskevich, A.K. Fedotov, A.V. Mazanik // Journal: Solid State Phenomena. – 2009. – Vol. 156–158. – P.91-94.
2. Bernard Terreaux, Phys. stat. sol. (a) 204, No. 7, 2129–2184 (2007).

УДК 621.371.39

### КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

**Бойправ О.В., Богущ Н.В., Лыньков Л.М.**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Одним из факторов, определяющих надежность работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), является ее защищенность от воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона. В настоящее время это обеспечивается путем электромагнитной развязки контуров такой аппаратуры либо путем металлизации корпусов, в которые заключены ее излучающие элементы. Однако следствием реализации второго из указанных способов может являться возникновение переотраженных электромагнитных волн. Эти волны, будучи наведенными на проводные линии, по которым передаются сигналы управления РЭА, оказывают влияние на надежность функционирования последней. Решение такой проблемы реализуется путем снижения напряженности ЭМИ, переотражаемого от металлизированных корпусов рассматриваемой аппаратуры. Для этого на них наносят материалы, характеризующиеся диэлектрическими или магнитными свойствами [1]. В качестве таких материалов в

работе предлагается использовать композиты с наполнителями, содержащими титановые соединения. К ним относятся порошкообразные диоксид титана и титаномагнетит, которые по сравнению с иными порошковыми структурами, обеспечивающими потери энергии ЭМИ, характеризуются невысокой стоимостью.

Получение предложенных композитов реализовано с помощью метода литьевого прессования. При этом в качестве матрицы применялся кремнийорганический полимер. Выбор последнего обусловлен тем, что материалы на его основе характеризуются свойством гибкости (при условии, что объем полимера составляет, как минимум, 50 % от общего объема материала).

Экспериментальное обоснование эффективности использования предложенных композитов в целях снижения напряженности ЭМИ, переотражаемого от металлических материалов, выполнялась путем оценки значений их коэффициента отражения. При этом

применялся аппаратно-программный комплекс, включающий в себя следующие элементы:

- 1) панорамный измеритель SNA 0.01–17;
- 2) приемно-передающий тракт на основе волноводов и двух антенн типа П6-23М;
- 3) измерительные блоки для ответвления и детектирования амплитуды электромагнитных волн, падающих на поверхность исследуемых образцов и отражаемых от нее;
- 4) персональный компьютер, на котором установлено специальное программное обеспечение для управления процессом измерений и регистрации их результатов.

Измерения с использованием описанного аппаратно-программного комплекса выполнялись в автоматизированном режиме в соответствии с методикой, представленной в работе [2]. Исследованный диапазон частот ЭМИ – 0,7...17 ГГц. Выбор указанного диапазона обусловлен частотными характеристиками побочного ЭМИ современной РЭА [3].

Величина шага изменения значения частоты составляла 0,005 ГГц или 0,05 ГГц в зависимости от поддиапазона, в котором проводились измерения (0,7...2 ГГц или 2...17 ГГц соответственно). Количество контрольных точек, на которых проводились измерения значений коэффициента отражения ЭМИ в указанных диапазонах частот – 512.

На рисунках 1 и 2 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц образцов предложенных композитов. В ходе измерений этих образцы размещались на металлических подложках. Толщина образцов составляла  $0,5 \pm 0,1$  см.

Из рисунков 1 и 2 следует, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц композита с наполнителем на основе порошкообразного диоксида титана изменяются в пределах от –2 до –23 дБ, а в диапазоне частот 2...17 ГГц – от –6 до –16 дБ. При этом рассматриваемый композит обеспечивает наибольшее снижение напряженности ЭМИ, отражаемого от металлического материала, при условии, что частота такого излучения составляет 1,2 ГГц. Такая особенность может быть связана с тем, что на указанной частоте обеспечивается максимальное значение разности фаз электромагнитных волн, отражаемых от границ раздела «воздух–композит», «композит–металлический материал», «композит–воздух». Это обуславливает взаимную компенсацию их энергии. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 10...11 ГГц у композита с наполнителем на основе порошкообразного титаномагнетита выше на 1...8 дБ ниже, чем у композита на основе диоксида титана. Это обусловлено явлением естественного ферромагнитного резонанса, возникающего вследствие поглощения титаномагнетитом

энергии взаимодействующего с ним ЭМИ указанного диапазона частот [4].

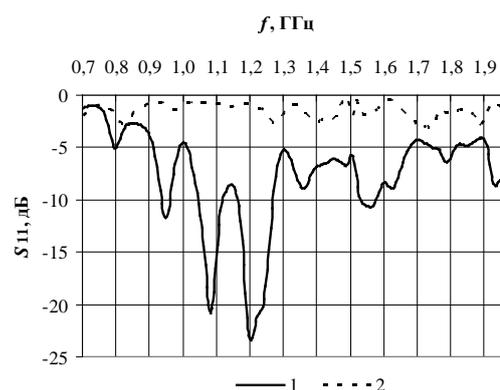


Рисунок 1 – Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц образцов композитов с наполнителем на основе диоксида титана (1) и титаномагнетита (2)

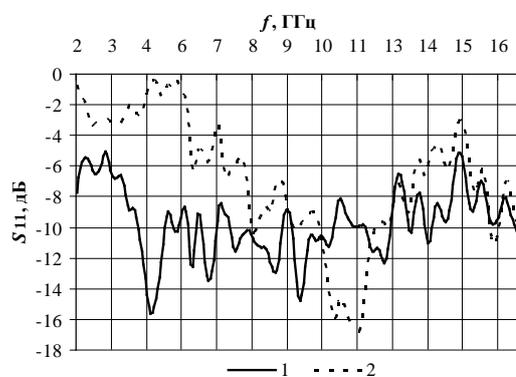


Рисунок 2 – Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2...17 ГГц образцов композитов с наполнителем на основе диоксида титана (1) и титаномагнетита (2)

Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах частот 0,7...10 ГГц и 11...17 ГГц у рассматриваемого композита на 1...15 дБ, чем у композита на основе диоксида титана. Это связано с тем, что порошкообразный титаномагнетит характеризуется узким рабочим диапазоном частот.

Представленные значения коэффициента отражения ЭМИ композитов соответствуют соотношению объемов наполнителей и связующего в них, составляющему 1:1. Определено, что указанное соотношение является оптимальным, т.к. при нем обеспечиваются минимально возможные величины исследуемого параметра для композита при условии отсутствия деструкции последнего, обусловленной сорбцией влаги из связующего частицами порошкообразного наполнителя.

Таким образом, на основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что в целях снижения напряженности ЭМИ, переотражаемого от металлизированных корпусов РЭА, наиболее эффективным представляется

использование композитов, в состав которых входит порошкообразный диоксид титана. При этом может использоваться один из следующих способов.

Способ 1. Нанесение на корпуса РЭА находящейся в жидкой фазе смеси кремнийорганического полимера и порошкообразного диоксида титана. Смешивание указанных компонентов при этом необходимо реализовывать с помощью промышленного миксера. Толщина наносимого слоя смеси будет определяться требованиями к диапазону частот ЭМИ, в котором необходимо обеспечить наибольшее снижение напряженности переотражаемого ЭМИ (т. е. наименьшее значение коэффициента отражения ЭМИ структуры «металлизированная поверхность–композит»). Минимальная величина коэффициента отражения будет соответствовать частоте, на которой значение длины электромагнитной волны в 4 раза превышает толщину слоя композита (т. е. структура «металлизированная поверхность–композит» будет четвертьволновой).

Способ 2. Закрепление на стенках корпусов

РЭА фрагментов композита с помощью термостойкого клея.

#### Литература

1. Самоквасова, Ю.Н. Методика выбора конструкционных материалов для задач экранирования электронных средств / Ю.Н. Самоквасова, М.А. Ромащенко // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 5. – С. 48–50.

2. Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / под ред. Л.М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2013. – 184 с.

3 Акбашев, Б.Б. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий / Б.Б. Акбашев, Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2014. – 472 с.

4. Электродинамические свойства диспергированных гексаферритовых наполнителей и радиопоглощающих покрытий / С.В. Серебрянников [и др.] // Электричество. – 2013. – № 5. – С. 37–40.

УДК 621.315.4/61

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИГЛОПРОБИВНОГО МАТЕРИАЛА

Абдухаджи Х.Д.А., Прудник А.М., Лыньков Л.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Целью работы является разработка экранов электромагнитного излучения на основе иглопробивного материала для повышения электромагнитной безопасности человека и среды его обитания, решения вопросов защиты информации и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

Для решения поставленной задачи были подготовлены две группы экспериментальных образцов экранов электромагнитного излучения на основе иглопробивного материала. Первая группа имела покрытие из клея на основе бутадиенстирольного каучука с порошкообразным титаномагнетитом, а вторая группа имела покрытие из огнезащитного состава с порошкообразным титаномагнетитом.

Толщина образцов в обеих группах была по 4,3 мм, а содержание порошкообразного материала составляло 30 и 50%, соответственно.

Измерения механических характеристик образцов экранов электромагнитного излучения производили в соответствии с [1]. Для испытания использовались разрывные машины с относительной погрешностью измерения силы  $\pm 1\%$ .

Образцы закрепляли в зажимах разрывной

машины, не касаясь его испытуемой части, с силой натяжения не более 0,3 Н так, чтобы он не скользил во время испытания и чтобы прилагаемая сила имела направление, параллельное его краям. Испытания проводили в машинном и поперечном направлениях. Результаты испытаний образцов, разорвавшихся у кромок зажимов, или сместившихся при испытании не учитывали.

Разрушающее усилие  $F$  определяли средним арифметическим значением результатов десяти измерений в машинном и поперечном направлениях. Разрушающее усилие округляли с точностью до 0,1 Н при значении до 50 Н, до 1 Н при значениях 50...500 Н, 5 Н при значениях 500...1000 Н, 10 Н при значениях свыше 1000 Н. Относительная погрешность определения разрушающего усилия при растяжении не превысила  $\pm 4\%$  при доверительной вероятности 0,95.

Удельное сопротивление разрыву  $F_{уд}$ , кН/м, вычисляли по формуле  $F_{уд} = F / b$ , где  $F$  – разрушающее усилие, Н;  $b$  – ширина образца, мм.

Индекс прочности при растяжении  $I_F$ , Н·м/г, вычисляли по формуле  $I_F = (F_{уд} / m_a) 10^3$ , где  $F$  – удельное сопротивление разрыву, кН/м;  $m_a$  – масса материала площадью 1 м<sup>2</sup>, г.

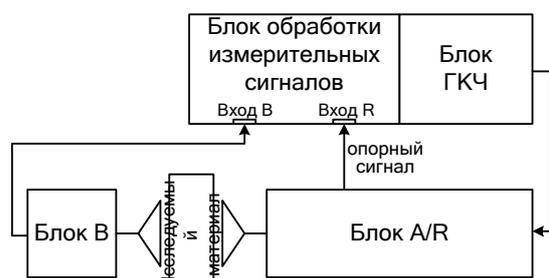
Предел прочности при растяжении  $\sigma$ , МПа, вычисляли по формуле  $\sigma = F / (b \cdot h)$ , где  $h$  – толщина образца, (среднее арифметическое результатов измерений толщины всех испытуемых образцов), мм.

Результаты округляли с точностью до 1,0 МПа. Относительная погрешность определения предела прочности при растяжении не превышает  $\pm 10\%$  при доверительной вероятности 0,95.

Результаты измерения предела прочности при растяжении образцов экранов электромагнитного излучения составили 10 и 5 кгс, для первой и второй групп, соответственно.

Эффективность экранирования образцов экранов электромагнитного излучения оценивали соотношением между напряженностями электрического поля в точке пространства при отсутствии и наличии в ней этого материала и характеризовалась коэффициентами отражения и передачи ЭМИ.

Для исследования экранирующих характеристик использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающий по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн. Измерения выполнялись с усреднением результата в три раза и включали в себя три этапа [2].



Структурная схема измерительной установки SNA 0,01-18

На первом этапе осуществлялась калибровка, во время проведения которой устанавливался оптимальный уровень мощности для работы детекторов измерителя. В данной модификации измерителя калибровка выполнялась автоматически.

Второй этап заключался в измерении коэффициентов передачи по схеме, изображенной на рисунке. При этом генератор качающейся частоты (ГКЧ) измерителя формировал сигнал в заданной полосе частот и через блок A/R подавал его в передающую антенну. Блок обработки измерительных сигналов регистрировал ЭМИ,

прошедшее через исследуемый образец.

Третий этап заключался в измерении коэффициентов отражения. При этом на выходе устанавливался короткозамыкатель, ГКЧ измерителя формировал сигнал в заданной полосе частот и через блок A/R подавал его в передающую антенну. Блок обработки измерительных сигналов регистрировал ЭМИ, отраженное от исследуемого образца. Относительная погрешность измерений составила  $\pm 1\%$ .

Измерения включали в себя два этапа. На первом этапе осуществлялась калибровка, в процессе которой определялись уровни мощности ЭМИ генератора в полосе частот 0,8...16 ГГц, соответствующие уровням мощности ЭМИ на приемной антенне в 1 мВт, 2 мВт, 3 мВт, 4 мВт и 5 мВт. При этом между передающей и приемной антеннами образец не устанавливался. С целью увеличения точности дальнейших измерений калибровка на каждой из частот проводилась десятикратно.

Показано, что коэффициент передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2 ГГц для образцов 1-й группы составил  $-1...-4$  дБ, а в диапазоне частот 2–17 ГГц  $-3,9...-14,7$  дБ. В свою очередь, коэффициент отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2 ГГц для этой группы образцов составил  $-4,7...-9,9$  дБ, а в диапазоне частот 2–17 ГГц  $-0,2...-14,2$  дБ.

Показано, что коэффициент передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2 ГГц для образцов 2-й группы составил  $-1,2...-3,6$  дБ, а в диапазоне частот 2–17 ГГц  $-3,5...-13,2$  дБ.

Кроме того, очередь, коэффициент отражения в диапазоне частот 0,7–2 ГГц составил  $-4,3...-10,3$  дБ, а в диапазоне частот 2–17 ГГц составил  $0...-17$  дБ.

Также у образцов наблюдался выраженный полуволновой резонанс на частоте 8 ГГц, что объясняется волокнистой структурой материала и наличием разнородных слоев.

## Литература

- ГОСТ ИСО 1924-1-96. «Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Часть 1. Метод нагружения с постоянной скоростью».
- Абудади Х.Д.А., Аль-Машатт Е.А.А., Ал-сайх Н.Б.А., Бойправ О.В., Прудник А.М. Электромагнитные характеристики углеродсодержащего нетканого материала с геометрическими неоднородностями // Доклады БГУИР. – 2017. – № 1 (95). – С. 87–90.

УДК 621.9.048

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ БОРОВ ПУТЕМ ЕЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Киселев М.Г., Богдан П.С., Русанов А.П.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния электроэрозионной обработки (модифицирования) изношенной рабочей поверхности стального и твердосплавного зубных боров на восстановление ее режущей способности.

На рисунке 1 приведены значения интенсивности резания текстолитовой пластины испытываемыми борами при трех состояниях их рабочей поверхности: в исходном, изношенном и после электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности при  $U = 75$  и  $120$  В.

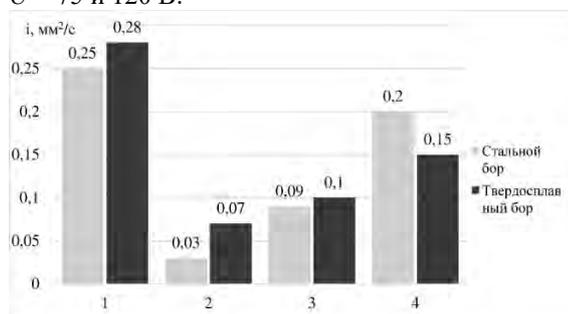


Рисунок 1 – Значения интенсивности резания текстолитовой пластины испытываемыми борами с различным состоянием режущей поверхности: 1 – в исходном состоянии; 2 – в изношенном состоянии; 3 – модифицированная изношенная поверхность при  $U = 75$  В; 4 – модифицированная изношенная поверхность при  $U = 120$  В

Из полученных экспериментальных данных видно, что наибольшей режущей способностью обладают боры в исходном состоянии. Так, для стального бора значение  $i$  в этом случае составило  $0,25 \text{ мм}^2/\text{с}$  и для твердосплавного –  $0,28 \text{ мм}^2/\text{с}$ . В результате изнашивания режущих зубьев на их поверхностях интенсивность резания снизилась для стального бора до  $0,03 \text{ мм}^2/\text{с}$  и для твердосплавного – до  $0,07 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Для удобства последующего сравнительного анализа влияния состояния поверхности боров на их режущую способность примем значение этого показателя боров в исходном состоянии за 100%. Тогда режущая способность изношенного стального бора составит 14 % от исходной, а твердосплавного – 27 %. После модифицирования изношенных поверхностей испытываемых боров их режущая способность возрастает и тем больше, чем выше напряжение накопительного конденсатора. Так, при повышении  $U$  с 75 до 120 В интенсивность резания стальным бором увеличилась с  $0,09$  до  $0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$  и твердосплавного – с  $0,1$  до  $0,15 \text{ мм}^2/\text{с}$ , т.е.

их режущая способность, соответственно, возросла с 37 до 80 % и с 36 до 55% по отношению к исходной.

Из сравнения полученных данных видно, что в результате изнашивания режущих зубьев на рабочей поверхности бора ее диаметр по сравнению с исходным уменьшается. После осуществления модифицирования за счет образовавшихся по краям лунок наплывов металла его значение увеличивается на удвоенную высоту этих наплывов. В таблице 1 приведены значения диаметров рабочей поверхности испытываемых боров при различном ее состоянии.

Таблица 1. Значения диаметров рабочей поверхности испытываемых боров при различном ее состоянии

Состояние рабочей поверхности испытываемого бора	Диаметр рабочей поверхности испытываемого бора, мм	
	Стального бора	Твердосплавного бора
Исходное состояние	1,53	2,08
Изношенное состояние	1,33	1,92
Модифицированная при $U = 75$ В изношенная поверхность бора	1,35	1,94
Модифицированная при $U = 120$ В изношенная поверхность бора	1,43	1,98

Из представленных данных следует, что в результате изнашивания режущих зубьев боров диаметр их рабочей поверхности уменьшился для стального бора на  $0,2$  мм и для твердосплавного на  $0,16$  мм. В результате проведения модифицирования при  $U = 75$  В диаметр их изношенной поверхности увеличился для стального бора на  $0,03$  мм и для твердосплавного – на  $0,02$  мм, а при  $U = 120$  В это увеличение, соответственно, составило  $0,1$  и  $0,06$  мм. Такое увеличение диаметра изношенной поверхности боров после ее модифицирования связано с формированием на ней лунок, имеющих по краям наплывы металла, выходящие за ее исходный контур. При этом с увеличением напряжения накопительного конденсатора в процессе модифицирования

изношенной поверхности бора высота этих наплывов металла возрастает. Объясняется это тем, что с повышением  $U$  увеличивается энергия электрического разряда, что приводит к увеличению размеров получаемой на поверхности бора лунки, включая высоту образовавшихся по ее краю наплывов металла. При постоянной энергии электрического разряда и условий его протекания (в нашем случае при неизменном значении  $U$ ), размеры и параметры получаемой лунки зависят от теплофизических свойств материала поверхности, в частности теплоты испарения, удельной теплоемкости, теплопроводности, температуры плавления [1].

Из полученных результатов видно, что размеры лунки, полученной на поверхности стального образца, существенно превосходят размеры лунки на поверхности твердосплавного. При этом важно отметить, что по краю лунки, полученной на поверхности стального образца, образуются значительно большие по размеру наплывы металла на поверхности твердосплавного. Как уже отмечалось, эти наплывы металла оправданно рассматривать как своеобразные режущие элементы (зубья) на модифицированной поверхности бора, придающие ей режущую способность. Поэтому, чем больше высота наплывов металла, т.е. высота зубьев, на модифицированной поверхности бора, тем выше его режущая способность. Именно этим объясняется более низкая степень влияния модифицирования изношенной рабочей поверхности твердосплавного бора на восстановление ее режущей способности (55% от первоначальной) по сравнению со стальным бором, у которого режущая способность восстанавливается до 80% от первоначальной.

Выводы:

1. Установлено, что после модифицирования изношенной поверхности испытуемых боров режущая способность возрастает и тем больше, чем выше напряжение  $U$  накопительного конденсатора. Так, при повышении  $U$  с 75 до

120 В интенсивность резания текстолита стальным бором увеличилась с 0,09 до 0,2 мм<sup>2</sup>/с и твердосплавным бором – с 0,1 до 0,15 мм<sup>2</sup>/с, что соответствует повышению режущей способности по отношению к исходной равной 100% стального бора с 37 до 80% и твердосплавного с 36 до 55%.

2. Установлено, что в результате модифицирования изношенной рабочей поверхности испытуемых боров на ней формируются лунки, имеющие по краям наплывы металла, выходящие за ее исходный контур, высота которых увеличивается с повышением напряжения накопительного конденсатора, что приводит к увеличению диаметра обработанной поверхности. Так при  $U = 75$  В диаметр стального бора по отношению к изношенному увеличился на 0,06 мм и твердосплавного на 0,02 мм, а при  $U = 120$  В увеличение этого параметра, соответственно, составило 0,1 и 0,06 мм.

3. Показано, что эти наплывы металла оправдано рассматривать как своеобразные режущие элементы (аналоги зубьев) на модифицированной поверхности боров, восстанавливающие режущую способность их изношенной поверхности и тем эффективнее, чем больше высота этих наплывов. Установлено, что при постоянном значении напряжения накопительного конденсатора ( $U = 120$  В) размеры единичной лунки и высота наплывов по ее краю, полученной на поверхности стального образца, оказываются значительно больше, чем на поверхности твердосплавного, что объясняет более низкую режущую способность модифицированной поверхности твердосплавного бора (55%) против 80% стального бора.

Литература

1. Артамонов, Б.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 1: Обработка материалов с применением инструмента. – 247 с.

УДК 621.792

## ТЕХНОЛОГИЯ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВИНТОВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

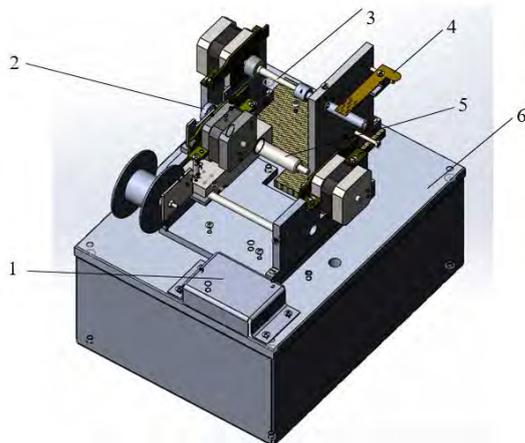
Киселев М.Г., Монич С.Г., Русанов А.П.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Для разработки технологии модифицирования поверхности винтовых титановых стоматологических имплантатов и ее внедрения в производство необходимо было создать соответствующее технологическое оборудование, в частности, установку, реализующую данную технологию БНТУ.01300.00006.

На основе апробированной технологической схемы, примененной в ходе проведения экспериментальных исследований, а также с учетом установленных рациональных режимов модифицирования поверхности винтовых титановых стоматологических имплантатов была спроектирована и изготовлена оригинальная

установка АТЮФ.041815.0007, приведенная на рисунке 1.



1 – пульт управления; 2 – механизм подачи электрода-инструмента; 3 – механизм крепления и вращения имплантата; 4 – механизм подвода напряжения; 5 – механизм перемещения электрода-инструмента; 6 – основание

Рисунок 1 – Трехмерная модель установки модифицирования поверхности винтовых титановых стоматологических имплантатов

Для обеспечения рациональных режимов модифицирования поверхности имплантата [1-4], в частности, коэффициента расположения лунок, необходимо обеспечить соответствующую последовательность работы всех трех шаговых электродвигателей. Так, после формирования на винтовой поверхности имплантата лунки, за время отхода от нее проволочного электрода-инструмента, заготовка должна повернуться на угол, обеспечивающий получение следующей лунки с требуемым коэффициентом расположения лунок ( $\beta_p=1,0-1,15$ ). Значение этого угла определяется по формуле:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{2 \cdot r^2 - k_{\alpha}^2 d_{\alpha}^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2 \cdot r^2}\right),$$

где  $r$  – радиус винтовой поверхности имплантата;  $d_{\alpha}$  – диаметр лунки;  $\alpha$  – угол подъема винтовой линии.

С учетом того, что средний радиус винтовой поверхности заготовки  $r$  составляет 2,0 мм, коэффициент расположения лунок  $\beta_p = 1,1$ ; диаметр лунки, формируемый при напряжении накопительного конденсатора 80 В и его емкости 400 мкФ при обработке с использованием дистиллированной воды, составляет 350 мкм, а угол подъема винтовой линии  $\alpha = 15^\circ$ , заготовка должна повернуться на угол, равный:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{2 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 - 1,1^2 (350 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \sin^2 15}{2 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2}\right) = 1,8^\circ.$$

Такая величина угла соответствует углу поворота шагового электродвигателя на 1 шаг.

Одновременно каретка должна переместиться в продольном направлении на величину  $x$ ,

обеспечивающую формирование этой лунки с учетом угла подъема винтовой поверхности имплантата при его повороте на угол  $\varphi$ :

$$x = k_{\alpha} \cdot d_{\alpha} \cdot \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол подъема винтовой линии.

Подставив соответствующие данные, получим:

$$x = 1,1 \cdot (400 \cdot 10^{-6}) \sin 15 = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ мм.}$$

В силу того, что привод перемещения каретки включает в себя передачу «винт-гайка», определим необходимый угол поворота винта:

$$\psi = \frac{x \cdot 360}{p},$$

где  $p$  – шаг резьбы винта (1,5 мм).

$$\text{Тогда } \psi = \frac{1,14 \cdot 10^{-4} \cdot 360}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 27,36^\circ.$$

Такой угол поворота винта будет соответствовать числу импульсов  $N$ , подаваемых на шаговый двигатель  $M_3$ :

$$N = \frac{\psi}{1,8} = 15,2 \text{ имп.}$$

Если принять, что на шаговый двигатель подаются управляющие импульсы с частотой 500 Гц, то время  $t_1$ , необходимое для поворота вала шагового электродвигателя  $M_1$ , составит 2 мс, а время  $t_3$  поворота вала шагового электродвигателя  $M_3$  – 30 мс.

Из конструктивных соображений расстояние  $Z$  от рабочего конца проволочного электрода-инструмента до поверхности имплантата примем равным 3 мм. Тогда, для перемещения электрода-инструмента на это расстояние до контакта с поверхностью заготовки, подающие ролики должны повернуться на угол  $\gamma_+$ :

$$\gamma = \frac{z \cdot 360}{2\pi \cdot R_p},$$

где  $R_p$  – радиус подающих роликов, 8 мм.

$$\text{Тогда } \gamma_+ = \frac{3 \cdot 360}{2\pi \cdot 8} = 21,5^\circ$$

, что соответствует 12 импульсам, подаваемым на шаговый двигатель  $M_2$  с временем его срабатывания равным 2 мс.

На этой стадии на расстоянии равном минимальному значению МЭП происходит разряд между поверхностями продолжительностью  $t \approx 40$  мкс, после чего наступает фаза их механического контактирования продолжительностью  $t_k \approx 8$  мс. Для возвращения электрода-инструмента в первоначальное положение подающие ролики должны повернуться в противоположном направлении на угол  $\gamma_-$ , равном углу  $\gamma_+$  при подаче на шаговый двигатель  $M_2$  12 импульсов с временем его срабатывания равным 24 мс.

После этого, для получения следующей лунки на поверхности имплантата, вал шагового двигателя  $M_2$  должен повернуться на угол  $\gamma_+$ , обеспечивая тем самым перемещение электрода-инструмента до контакта с обрабатываемой поверхностью заготовки. Таким образом, общая

продолжительность времени  $T_p$  между двумя последовательными разрядами составит время порядка 56 мс. При этом значение  $T_p$ , т.е. частота замыкания электрической цепи, должна обеспечивать, во-первых, гарантированное срабатывание шаговых двигателей  $M_1$  и  $M_3$ , а, во-вторых, полную зарядку конденсатора емкостью  $C$  в разрядной цепи. Это время  $\tau$  определяется по известной формуле  $\tau = RC$ , где  $R$  – сопротивление цепи, которое в данном случае определяется, главным образом, сопротивлением токоограничивающего резистора  $R$ , равного 0,52 Ом. Тогда время  $\tau$  при  $C = 400$  мкФ составит 0,21 мс.

Из полученных расчетных данных следует, что продолжительность времени  $T_p$  между двумя последовательными разрядами обеспечивает гарантированное срабатывание шаговых двигателей  $M_1$  и  $M_3$ , а соответственно, поворот заготовки на требуемый угол и осевое перемещение электрода-инструмента на заданную величину, а также полную зарядку накопительного конденсатора в разрядной цепи.

Управление работой этих шаговых двигателей осуществляется с помощью специально разработанного программируемого электронного блока, который позволяет осуществлять процесс обработки поверхности имплантата в автоматическом режиме с обеспечением рациональных режимов ее модифицирования. При этом основное время выполнения операции  $T_0$  при длине рабочего хода  $L_p = 25$  мм и продольной подаче  $S_{пр} = 2,9$  мм/мин составляет 8,5 мин. В состав вспомогательного времени  $T_v$  входят затраты времени на установку и снятие имплантата  $T_{у.с.}$ , время на перемещение электрода-инструмента в исходное положение  $T_{пер.}$  и время на управление установкой  $T_{уст.}$ .

Экспериментально установлено, что  $T_{у.с.} = 0,25$  мин,  $T_{пер.} = 0,08$  мин и  $T_{уст.} = 0,10$  мин. Таким образом, оперативное время  $T_{оп.}$  выполнения операции модифицирования поверхности имплантата ( $T_{оп.} = T_{о.} + T_{в.}$ ) составит 8,93 мин. Если принять подготовительно-заключительное время  $T_{п.з.}$  равным нулю (для крупносерийного производства), то производительность работы установки будет составлять – 9 имплантатов в час.

С учетом полученных данных по техническому нормированию разработана технология модифицирования поверхности винтовых титановых стоматологических имплантатов на данной установке.

#### Литература

1. Вильямс, Д.Ф. Имплантаты в хирургии / Д.Ф. Вильямс, Р. Роуф; пер. с англ. Е. В. Колпакова. – М. : Медицина, 1978. – 552 с.
2. Jarcho, M. Calcium phosphate ceramics as hard tissue prosthetics / M. Jarcho // *Clinical Orthopaedics a. Related Research*. – 1981. – Vol. 157, № 6. – P. 259–278.
3. Киселев, М.Г. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, П.С. Богдан, С.Г. Мониц // *Наука и техника*. – 2013. – №2. – С.23–27.
4. Влияние методов обработки поверхности титановых имплантатов на физико-химические и биохимические характеристики их поверхности / М. Г. Киселев [и др.] // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 70–75.

УДК 621.9.048

### МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПИЛИВАЕМОГО МАТЕРИАЛА С НАПЛЫВАМИ МЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННЫМИ НА ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА, В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Киселев М.Г., Богдан П.С., Ямная Д.А., Давыдова К.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Результатами ранее проверенных исследований [1-3] установлено, что за счет воздействия на гладкую металлическую поверхность электрическими разрядами ей можно придать режущую способность. Достигается это за счет того, что в результате электрической эрозии на ней формируются лунки по форме близкие к сферической, которые имеют по краям наплывы (валики) металла, выходящие за исходный контур поверхности, как показано на рисунке 1. Именно эти наплывы металла выполняют роль своеобразных режущих элементов, которые при распиливании способны

снимать стружку с поверхности материалов,ступающих по твердости металлу наплывов. Важно подчеркнуть, что геометрические параметры формируемых лунок, включая форму и размеры образовавшихся по их краям наплывов металла определяются условиями и режимами выполнения операции электроэрозионного модифицирования поверхности, в частности, энергией электрического разряда, наличия и свойств применяемой диэлектрической жидкости [4, 5]. Отсюда следует, что путем варьирования режимов и условий электроэрозионного модифицирования

поверхности, можно за счет изменения формы и размеров образовавшихся напыльвов соответствующим образом влиять на условия их взаимодействия с обрабатываемым материалом в процессе его распиливания. В этой связи, цель данной работы заключалась в разработке методики физического моделирования условий взаимодействия обрабатываемого материала с напыльвами металла, полученными на гладкой поверхности инструмента в результате ее электроэрозионного модифицирования.

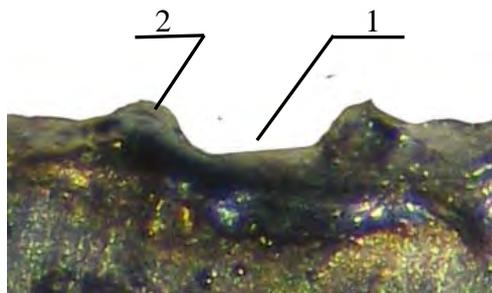


Рисунок 1 – Фотография единичной лунки, полученной на поверхности стальной штрипсы (1 – лунка; 2 – напыльв металла)

В качестве модели инструмента, в частности, штрипсы использовались полосы из латуни шириной 20 мм, длиной 150 мм и толщиной 5 мм. Для моделирования напыльвов металла на ее поверхности применялись стальные шайбы наружным диаметром 16, внутренним 9 и толщиной 2 мм. При этом наружный и внутренний диаметры шайбы и ее толщина в масштабе 50:1 соответствовали диаметру напыльвов по краю лунки, ее диаметру и высоте напыльвов. Предварительно путем механической обработки наружной кромке шайбы с ее одной стороны придавалась скругленная, как у напыльвов металла по краю лунки, форма с различным радиусом скругления. Затем с помощью эпоксидной смолы шайба своей плоской поверхностью закреплялась на поверхности латунной пластины, как и показано на рисунке 2.

Изучение условий взаимодействия напыльвов металла на поверхности пластины с обрабатываемым материалом проводилось с помощью специально созданного устройства, схема которого и фотография общего вида представлена на рисунке 3. Оно состоит из неподвижного кронштейна 1, на котором закрепляется пластина с шайбой 2; горизонтальных направляющих 3, на которых неподвижно устанавливается образец обрабатываемого материала 4. От электродвигателя РД-09 со встроенным редуктором посредством передачи винт-гайка направляющая получает поступающее перемещение с очень малой скоростью. Предварительно, путем регулировочных

перемещений в вертикальном направлении пластины с шайбой на кронштейне, устанавливается необходимая глубина резания. Непосредственно процесс взаимодействия рабочей кромки шайбы (модель напыльва металла) с материалом образца фиксировалась с помощью видеокамеры. После окончания процесса взаимодействия образца с рабочей поверхностью шайбы, он снимался и с помощью микроскопа ММИ-2 исследовались характер и параметры полученного на нем следа обработки при различной форме рабочей части шайбы. В качестве примера, на рисунке 4 представлена фотография следа обработки, полученного на поверхности гипсового образца при взаимодействии с острой кромкой шайбы (а) и со скругленной кромкой (б).

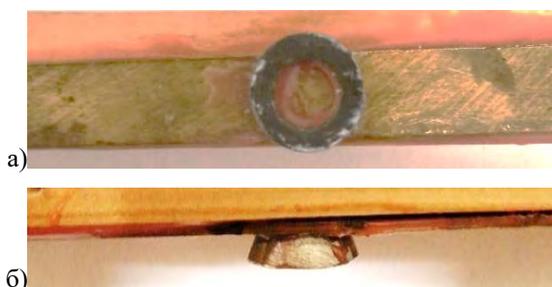


Рисунок 2 – Фотография пластины с закрепленной на ней шайбой: а – вид сверху, б – вид сбоку

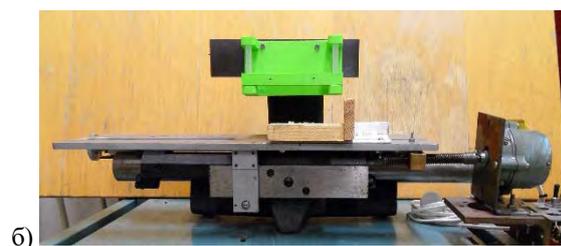
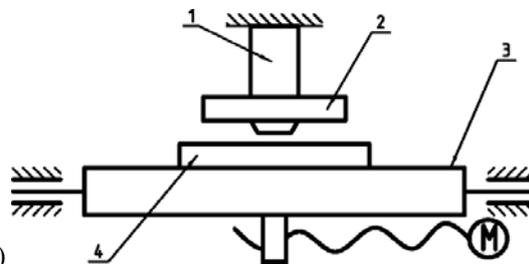


Рисунок 3 – Принципиальная схема (а) и фотография (б) устройства для изучения условий взаимодействия напыльвов металла на поверхности пластины с обрабатываемым материалом

Как видно, в первом случае след на поверхности образца формируется в результате резания с образованием элементов стружки, а во-втором – главным образом за счет его деформирования с образованием мелкодисперсных продуктов разрушения.

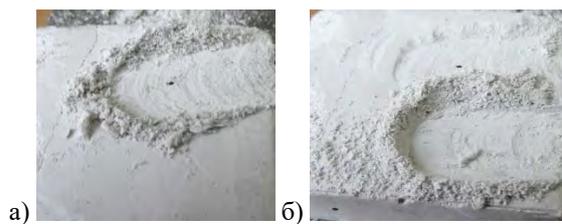


Рисунок 4 – Фотографии следа обработки на поверхности гипсового образца при взаимодействии с острой кромкой шайбы (а) и со скругленной кромкой (б)

Таким образом, разработанная методика и созданные аппаратные средства позволяют осуществлять физическое моделирование условий взаимодействия обрабатываемого материала с наплывами металла, полученными на гладкой поверхности инструмента в результате воздействия электрических разрядов.

1. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Москаленко А.В., Богдан П.С. Эффективность применения электроэрозионной обработки поверхности проволочного инструмента с целью придания

ей режущей способности // Вестник Полоцкого государственного университета. № 11, 2013. – С. 73–77.

2. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Габец В.Л., Богдан П.С. Экспериментальная оценка режущей способности штрипса с модифицированной поверхностью // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 3. – С. 64–68.

3. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Богдан П.С., Сентемова Д.В. Влияние скорости вращения рабочей поверхности отрезного диска в процессе ее электроэрозионной обработки на режущую способность инструмента // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – №2. – С. 58–62.

4. Артамонов, Б.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 1: Обработка материалов с применением инструмента. – 247 с.

5. Коваленко В. С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – Киев: Вища школа, 1975. – 236 с.

УДК 621.9.048

## МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗУБНОГО БОРА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЕГО ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Киселев М.Г., Богдан П.С., Семенкович В.П.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния электроэрозионной обработки (модифицирования) изношенной рабочей поверхности стального и твердосплавного зубных боров на восстановление ее режущей способности.

Согласно ГОСТ 22090.1-93 «Инструменты стоматологические вращающиеся» для стальных боров полный установленный ресурс машинного времени должен быть не менее 9 минут, а для твердосплавных – не менее 40 минут. Следует подчеркнуть, что изношенные боры, т.е. утратившие в силу износа зубьев режущую способность в дальнейшем не используются, а утилизируются.

Вместе с тем, результатами предшествующих исследований [1-3] показано, что путем электроэрозионной обработки (модифицирования) исходной гладкой поверхности инструментов (проволока, штрипса, отрезной диск), применяемых для распиливания различных материалов, ей можно придать режущую способность. Достигается это за счет того, что при воздействии на механическую поверхность единичного электрического разряда на ней формируется лунка (рисунок 1) по форме близкая

к сферической, по краям которой образуются наплывы металла, выходящие за исходный контур поверхности.

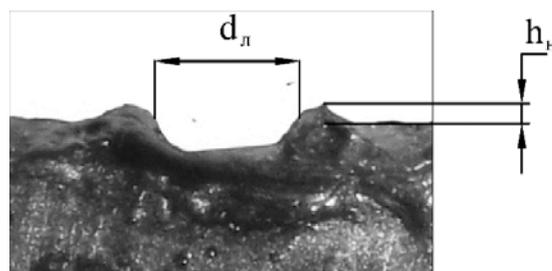


Рисунок 1 – Фотография единичной лунки сбоку, полученной на поверхности диска, с указанием ее основных элементов

Именно эти наплывы представляют собой своеобразные режуще-деформирующие элементы, способные в процессе обработки разрезать материал заготовки, твердость которого ниже твердости металла наплывов. При этом с возрастанием энергии электрического разряда высота этих наплывов металла  $h_n$ , выполняющих роль зубьев, увеличивается, что придает модифицированной поверхности более высокую режущую способность.

С учетом этого представляется перспективным использовать такую обработку для модифицирования изношенной рабочей поверхности стальных и твердосплавных боров с целью восстановления ее режущей способности и дальнейшего использования этих инструментов.

Объектом исследования являлись стальной и твердосплавный зубные боры, предназначенные для работы с прямым стоматологическим наконечником. Исходный диаметр цилиндрической головки стального бора, на которой выполнены шесть режущих лезвий, составлял 2,53 мм при длине рабочей части 3,5 мм и общей длине бора 44 мм. Твердосплавный бор диаметром рабочей части 2,08 мм также имел шесть режущих лезвий.

Электроэрозионное модифицирование изношенной рабочей поверхности испытуемых боров осуществлялось с помощью специального устройства, схема которого представлена на рисунке 2.

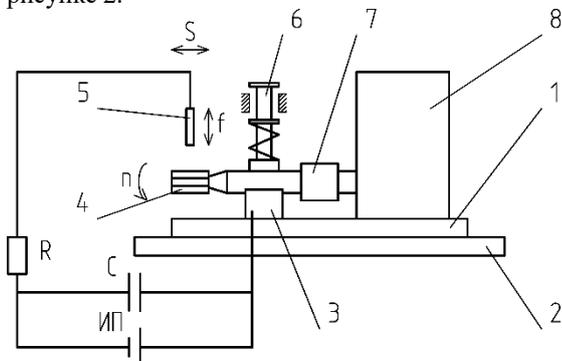


Рисунок 2 – Схема устройства электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности боров

На стальной плите 1, установленной на диэлектрическом (деревянном) основании 2, смонтирован электродвигатель 8 (ДСМ 2-П-220), с валом которого посредством эластичной муфты 7 соединен хвостовик обрабатываемого бора 4. Последний установлен в призме 3 и прижимается к ее поверхности с помощью пружинного прижима 6. Электродом-инструментом служит тонкая, толщиной 0,1 мм стальная пластина 5, которой вручную сообщается периодическое колебательное движение, направленное перпендикулярно изношенной поверхности бора. Электрод-инструмент и бор включены в электрическую цепь, состоящую из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора С и токоограничивающего резистора R. В процессе однократного акта сближения электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью бора на расстоянии, соответствующем минимальной величине межэлектродного промежутка (МЭП), между ними протекает электрический разряд, вызывающий формирование на ней лунки, имеющей наплывы застывшего металла. При этом в отличие от

размерной электроэрозионной обработки необходимо, чтобы формируемые на модифицированной поверхности лунки не перекрывали друг друга. В процессе обработки бору сообщается вращательное движение с частотой  $n = 3 \text{ мин}^{-1}$ , а электроду-инструменту колебательное с частотой  $f \approx 1 \text{ Гц}$ . Для модифицирования всей изношенной поверхности бора пластине дополнительно сообщается движение S вдоль его оси. Используется прямая полярность (анодом является бор), диэлектрическая жидкость не применяется. Модифицирование осуществлялось при двух значениях напряжения на накопительном конденсаторе 75 и 120 В.

Определение режущей способности испытуемых боров осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 30213-94 «Инструменты стоматологические вращающиеся. Методы испытаний» с использованием созданного устройства, схема которого приведена на рисунке 3.

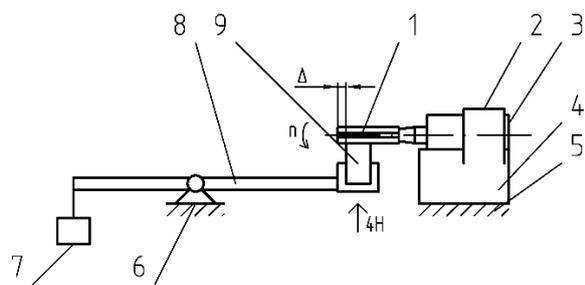


Рисунок 3 – Схема устройства определения режущей способности бора

Испытуемый бор 1 закрепляется в стоматологическом наконечнике 3, который с помощью хомута 2 своей цилиндрической поверхностью прижимается к поверхности призмы 4, неподвижно установленной на основании 5. На нем также закреплен кронштейн 6, в котором на опорах вращения установлен качающийся рычаг 8. На одном его конце закреплена пластина из текстолита 9 толщиной 1,5 мм, а на другом – аттестованные грузы 7, создающие усилие прижима пластины к режущей поверхности бора, равное 4 Н. Частота вращения бора контролировалась с помощью лазерного тахометра testo 465 и во всех экспериментах ее значение поддерживалось постоянным и составляло  $5000 \text{ мин}^{-1}$ .

Предварительно при отпущенном хомуте стоматологический наконечник перемещался в призме в осевом направлении таким образом, чтобы торец бора располагался относительно поверхности текстолитовой пластины на расстоянии  $\Delta = 1,0 \text{ мм}$ , после чего хомут зажимался.

Затем включался привод вращения стоматологического наконечника, текстолитовая пластина прижималась с заданным усилием к рабочей поверхности вращающегося бора, и в этот

момент запускался секундомер. По истечении 30 секунд процесс обработки прекращался, текстолитовая пластина выводилась из контакта с бором и переустанавливалась на рычаге таким образом, чтобы на ней можно было прорезать паз другим испытуемым бором, который бы располагался от предыдущего на расстоянии не менее 5 мм.

Режущая способность бора оценивалась по значению интенсивности резания  $i$  им текстолитовой пластины, которое определялось отношением площади  $F$  полученного на ней пропила ко времени обработки  $t = 30$  с, т.е.  $i = F/t$  (мм<sup>2</sup>/с). Величина  $F$  находилась как произведение толщины пластины  $b = 1,5$  мм на глубину  $h$  полученного на ней пропила ( $F = b \times h$ ). Значение  $h$  измерялось с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2 с точностью  $\pm 5$  мкм.

Испытаниям подвергались боры в исходном состоянии их рабочей поверхности (новые), в ее изношенном состоянии, и боры, изношенная рабочая поверхность которых была модифицирована путем электроэрозионной обработки. Изношенная рабочая поверхность бора получалась в результате обработки новым бором образца из гранита в течение 5 мин.

Диаметральные размеры рабочей поверхности боров при трех ее состояниях измерялись с помощью микрометра МР-25-0,001.

#### Литература

1. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Москаленко А.В., Богдан П.С. Эффективность применения электроэрозионной обработки поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2013. – № 11. – С. 73–77.
2. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Габец В.Л., Богдан П.С. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроэрозионной обработки рабочей поверхностью // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 3. – С. 64–68.
3. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Богдан П.С., Сентемова Д.В. Влияние скорости вращения рабочей поверхности отрезного диска в процессе ее электроэрозионной обработки на режущую способность инструмента // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – №2. – С. 58–62.

УДК 621.539

### СВЧ-ПЛАЗМОТРОН РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЧ ЭНЕРГИИ В ОБЪЕМЕ ПЛАЗМЕННОЙ КАМЕРЫ

**Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Земляков А.С., Пронина М.И., Лушакова М.С.**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

В резонаторных СВЧ-плазмотронах для получения разряда используется энергия «стоячих волн» [1]. Между двумя параллельными отражающими плоскостями (стенками резонатора) возбуждается плоская волна, распространяющаяся перпендикулярно к ним, при достижении одной из плоскостей волна полностью отражается от неё. Многократное отражение от обеих плоскостей приводит к образованию волн, распространяющихся в противоположных направлениях и интерферирующих друг с другом. Если расстояние между плоскостями кратно половине длины волны, то интерференция волн приводит к образованию стоячей волны, амплитуда которой при многократном отражении сильно возрастает, приобретая резонансные свойства [2]:

$$L = n\lambda/2, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между плоскостями;  $n$  – любое целое положительное число;  $\lambda$  – длина волны.

Наличие неоднородности распределения электрического поля в объеме резонатора приводит к неравномерности нагрева образцов, помещенных в разрядной камере в резонаторе

СВЧ плазмотрона, и, следовательно, к неравномерности скоростей обработки материалов.

В целях снижения неравномерности распределения СВЧ энергии в резонаторной камере было предложено использовать вращающийся диссектор, который крепится внутри резонатора. Диссектор представляет собой несколько металлических лопастей определенной конфигурации, закрепленных на общей оси [3]. Такое техническое решение позволяет перераспределить электромагнитную энергию в объеме резонатора.

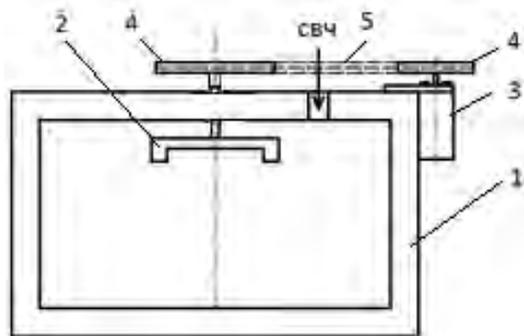
Экспериментальные исследования распределения электромагнитной энергии в разрядном объеме проводились на базе лабораторной СВЧ плазменной установки резонаторного типа (рисунок 1), которая используется для операций очистки полупроводниковых подложек, удаления фоторезистивных покрытий, лаков и мастик, плазмохимического осаждения пленок, модификации поверхности материалов, деталей и узлов сложной формы и т.д. [1, 4].



Рисунок 1 – СВЧ плазмотрон резонаторного типа

Основными элементами установки являются: корпус, генератор электромагнитных колебаний, резонатор прямоугольной формы 1 с горизонтально размещенным в нем кварцевым реактором 2 на подставке 4, источник питания СВЧ магнетрона, система газоснабжения, электрооборудование с системой управления и контроля. Внутри кварцевого реактора размещается подложкодержатель 3. В качестве генератора электромагнитных колебаний использовался магнетрон М-105, величина мощности которого достигает 600 Вт и частоты – 2,45 ГГц.

Система с динамическим перераспределением СВЧ энергии в резонаторе представляет собой диссектор, вращающийся за счет передачи движения от электродвигателя с помощью шкивов и приводного ремня (рисунок 2).

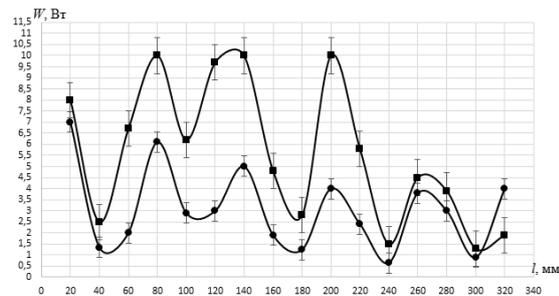


1 – резонаторная камера; 2 – диссектор;  
3 – электродвигатель; 4 – шкив;  
5 – приводной ремень

Рисунок 2 – Система с динамическим перераспределением СВЧ энергии в резонаторе

Характер распределения мощности СВЧ волны в объеме плазмы СВЧ разряда исследовался при помощи «активного зонда», который перемещался по оси кварцевой камеры СВЧ плазмотрона. Показания зонда регистрировались с помощью измерителя мощности через определенные расстояния по всей длине оси разрядной камеры. В качестве измерителя мощности использовался

термисторный мост Я2М-64 – устройство для определения изменения полного сопротивления термистора при поглощении мощности высокочастотных колебаний, а, следовательно, и величины мощности. На рисунке 3 представлены зависимости зарегистрированных показаний измерителя мощности при перемещении «активного зонда» по оси кварцевой трубы СВЧ плазмотрона в присутствии плазмы в кварцевой камере от расстояния от передней стенки при вращающемся и не вращающемся диссекторе.



■ – при не вращающемся диссекторе;  
● – при вращающемся диссекторе

Рисунок 3 – Зависимости зарегистрированных показаний измерителя мощности при перемещении «активного» зонда по оси кварцевой трубы СВЧ плазмотрона в присутствии плазмы в кварцевой камере от расстояния от передней стенки

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что вращение лопастей диссектора приводит к уменьшению разброса амплитуды колебаний величины СВЧ энергии по оси разрядной камеры. При вращении диссектора условия распространения для электромагнитных волн в зависимости от расположения лопастей изменяются, поэтому структура поля в камере постоянно трансформируется, что приводит к снижению неравномерности распределения электромагнитной энергии в резонаторной камере СВЧ-плазмотрона.

При проведении плазменных процессов обработки в СВЧ плазмотроне резонаторного типа предложенное конструктивное решение с использованием вращающейся оси с определенным профилем лопастей позволяет уменьшить неравномерность интенсивности величины СВЧ энергии в объеме разрядной камеры, что может обеспечить увеличение равномерности при обработке материалов и изделий электронной техники.

1. Бордусов, С. В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники / под. ред. А. П. Достанко. – Минск.: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. Де Бройль Л. Электромагнитные волны в волноводах и полых резонаторах: пер. с фр.

- М.С. Головиной; под ред. В.Т. Овчарова. – М.: ИЛ, 1948. – 91 с.
3. Мирошниченко, С.П. Микроволновые печи: учебно-метод. пособие по курсу «Бытовая электроника» / С.П. Мирошниченко, В.В. Поляков // – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 38 с.
4. Бордусов, С.В. Конструктивные особенности установки и технологические процессы СВЧ плазменной обработки материалов в условиях низкого вакуума / С.В. Бордусов // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2001. – Т.6, № 4. – С. 62–64.

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСАДКУ И КОРОБЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТА

Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Усадка является одной из важнейших технологических и эксплуатационных характеристик материала. Точность размеров и взаимозаменяемость деталей зависят от целого комплекса причин, в котором на долю усадки и ее коробления приходится 75-80 %. Кроме того, усадка приводит к возникновению значительных внутренних напряжений, потере деталями геометрической формы, короблению, трещинам, отслаиванию футеровки и т.д. Определение усадочных характеристик имеет важное значение при конструировании и изготовлении деталей приборостроения, машиностроения, других отраслей промышленности, при конструировании формующего инструмента, оценке работоспособности и надежности конструкций, выборе марки и оценке эксплуатационных качества материала. Как правило, под усадкой понимается уменьшение объема (объемная усадка) или размеров (линейная усадка) по сравнению с размерами оформляющих деталей пресс-формы, происходящее при изготовлении изделия, а также в результате его хранения и эксплуатации. Обычно измеряют линейную усадку изделия в направлении, перпендикулярном направлению движения пуансона, так как этот размер получается наиболее точным, легко контролируется и обычно является посадочным или сопрягаемым.

Важно различать действительную и расчетную линейную усадки. Под действительной линейной усадкой понимается разность между размером одного и того же элемента детали, определенным при температуре, соответствующей началу усадки, (фактически это размер пресс-формы, нагретой до температуры прессования) и размером после полного охлаждения детали. Под расчетной линейной усадкой понимается разность между размером оформляющего элемента пресс-формы  $L_{p1}$ , измеренным при температуре 293 К, и размером соответствующего элемента детали  $L_{p2}$ , измеренным при той же температуре. Эта разность дает абсолютную величину расчетной усадки.

Выбор образцов имеет большое значение при определении влияния различных параметров на

величину усадки. Это объясняется прежде всего тем, что конфигурация образца влияет на получаемый результат, правильная оценка которого возможна лишь при наличии определенных критериев, позволяющих производить сравнение. Поэтому величины относительных расчетных усадок, определённые для одного и того же материала, но на разных образцах или деталях, колеблются в довольно широких интервалах. Правильное и точное измерение усадки деталей очень важно, достоверность получаемых результатов зависит от многих факторов. Суммарная погрешность измерения включает в себя погрешность измерительных и поверочных средств, а также погрешности из-за отклонения температуры, непостоянства измерительного усилия и деформации детали при ее извлечении из пресс-формы. ГОСТ 18616-73 предусматривает измерение усадки с помощью универсальных измерительных инструментов: штангенциркуля и микрометра. Результаты таких измерений следует рассматривать только как ориентировочные из-за неопределенности прикладываемого измерительного усилия и смещения точек измерения. Это приводит к тому, что заданный допуск размера становится одного порядка с величиной погрешности измерения.

При использовании специальных приборов и приспособлений с индикаторами часового типа точность измерения возрастает до 0,005 мм при фиксированном измерительном усилии  $2 \cdot 10^{-3}$  Н. Вследствие этого, приспособления с индикаторами широко используются в лабораторной практике и в цеховых условиях.

Усадка представляет собой сложное явление и зависит от многих факторов: технологических параметров формования, способа подготовки материала, режима охлаждения изделия после извлечения из пресс-формы, конструкции изделия и структурных параметров композиции (длины и диаметра армирующих элементов, их объемного содержания  $C_0$ , закона распределения в объеме).

Анализ влияния структурных параметров на усадку может быть осуществлен путем решения

задачи об определении перемещений и напряжений вязкоупругой среды, содержащей коротковолокнистые упругие включения. Эта задача является чрезвычайно сложной для решения даже численными методами. Поэтому в настоящее время представляется наиболее целесообразным качественный анализ на основе упрощенной модели, позволяющей приближенно выявить основные закономерности влияния структурных параметров на усадку рассматриваемых композиций. Такой анализ естественно начать с однонаправленной композиции, которую можно представить в виде элементарных моделей – звеньев, последовательно соединенных таким образом, что вероятность несовпадения торцов армирующих элементов в двух смежных звеньях будет равна объемному содержанию полимерной матрицы  $1 - c_0$ .

Влияние технологических параметров изготовления деталей на величину усадки определяется, во-первых, случайными отклонениями от заданных режимов и, во-вторых, возможностью изменять технологические параметры в определенных пределах с целью обеспечения заданных размеров деталей. Этому вопросу посвящено значительное количество работ, в которых изучалось раздельное влияние основных технологических параметров – давления прессования  $P$ , температуры  $T$  и времени выдержки  $\tau$  – на усадку композиционных материалов с порошкообразным наполнителем, но без учета совместного действия этих факторов.

Опыт переработки стекловолоконистых пресс-материалов показывает, что во многих случаях даже для сравнительно простых изделий наблюдается отклонение от заданной чертежом геометрической формы, связанное с короблением изделий. Коробление является одним из наиболее распространенных видов брака и происходит, если имеются различия в величине усадки по объёму изделия. В этом случае свободная деформация отдельных частей изделия при его охлаждении оказывается затрудненной, что приводит к появлению внутренних напряжений и изгибающих моментов, вызывающих коробление.

Различия в усадке являются следствием неодинаковых условий протекания сложных физико-химических процессов во время формования изделия (отверждение, возникновение и релаксация напряжений) и после его извлечения из пресс-формы (охлаждение, релаксация напряжений) и зависят от большого числа факторов, точный учет влияния которых в настоящее время произвести не представляется возможным. К таким факторам относятся разнотолщинность элементов изделия, различия в температуре нагрева матрицы и пуансона,

нестационарность и неоднородность температурного поля пресс-формы, анизотропия усадки. Для хаотически армированных стеклопластиков различия в усадке определяются главным образом разной степенью ориентации армирующих волокон по зонам изделия, т.е. технологической анизотропией усадки.

Рассмотрим некоторые типичные случаи коробления хаотически армированных стеклопластиков. При изготовлении плоской детали типа пластины методом компрессионного формования отсутствует течение, а, следовательно, механические свойства изотропны. Однако по периметру изделия, у его кромок, наблюдается ориентация армирующих элементов вдоль кромок из-за ограничения возможных углов расположения армирующих элементов. Вследствие этого усадка в зоне кромок меньше усадки средней части изделия, а возникающие напряжения сжатия по контуру изделия приводят к короблению в результате потери устойчивости.

В случае осесимметричного изделия в форме усеченного конуса с днищем в средней зоне стенок изделия армирующие элементы ориентируются в вертикальном направлении. Ближе к кромке изделия происходит дезориентация первоначального потока или его ориентация вдоль кромки. В результате усадка в окружном направлении у кромки изделия будет ниже, чем в средней зоне стенок, и кромки изделия будут испытывать сжимающие напряжения. Под действием указанных напряжений возможна локальная потеря устойчивости, и первоначально круглое поперечное сечение вблизи кромки искажается.

Увеличению анизотропии прочности соответствует увеличение коэффициентов анизотропии усадки, при этом в направлении ориентации прочностные показатели возрастают, а усадка уменьшается, в перпендикулярном направлении – наоборот. Повышенная усадка днища заставляет изделие коробиться. При этом в кромке возникают сжимающие напряжения, а в нижних зонах – растягивающие напряжения, о чем свидетельствуют и результаты измерения тензометрическим методом деформаций образцов после вырезания их из изделия.

Неоднородность механических свойств и усадки может быть в значительной степени нивелирована дополнительным армированием отдельных частей детали стекловолоконистыми материалами стабильной структуры в виде тканей, сетки, жгутов и др. Это существенно уменьшает коробление. В общем случае при решении задачи о короблении хаотически армированных изделий необходимо учитывать неоднородность и нестационарность температурного поля, вязкоупругие свойства материала.

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ НА ИХ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Кутепов А.Ю., Крень А.П.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время нанесение различных функциональных покрытий на поверхность деталей и сборочных единиц космической техники с целью придания им заданных свойств является необходимым условием их надежной работы. Одним из основных показателей качества покрытий является отсутствие внутренних напряжений, которые могут привести к разрушению покрытия. Поэтому разработка современной аппаратуры и технологии оценки распределения напряжений в таких специальных, обладающих улучшенными коррозионными, теплозащитными и износостойкими свойствами видов покрытий, как толстослойные никелевые покрытия, представляется весьма актуальной.

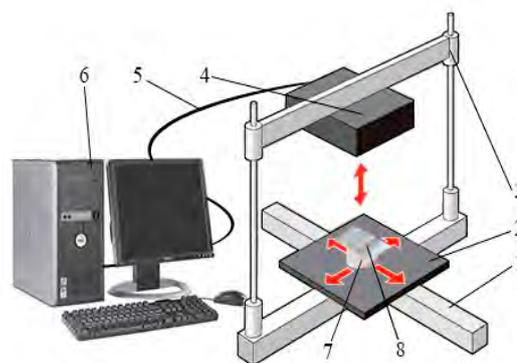
Отличительными особенностями процесса нанесения и контроля таких покрытий является тот факт, что толстослойные никелевые гальванические покрытия не являются однородными, а их свойства, в частности, магнитные, во многом зависят от технологических факторов при их нанесении, основными из которых являются загрязнение и температура электролита, скорость его прокатки и др. Эти факторы можно условно свести к одному, поскольку все они изменяют внутренние напряжения в покрытии, а последние, в свою очередь, оказывают влияние на магнитные свойства никелевого покрытия и качество покрытия в целом. Из теории ферромагнетизма известно, что наиболее сильное влияние внутренних напряжений на магнитные свойства металлов наблюдается в слабых и средних магнитных полях, уменьшаясь при воздействии сильных магнитных полей.

Для измерения внутренних напряжений в настоящее время используются такие методы, как акустический, метод лазерной интерферометрии, основанный на регистрации малых перемещений, возникающих в окрестности несквозного отверстия, просверленного в исследуемой зоне материала объекта, метод спирального контрактометра и метод изогнутой пластины. Для проведения контроля готовых изделий также используются метод измерения напряжений с помощью рентгеновского дифрактометра, коэрцитиметра а также магнитоанізотропный метод. Однако все перечисленные выше методы обладают следующими недостатками: приборами, реализующими данные методы либо невозможно проводить измерения на изделиях сложной формы, либо малой толщины, либо возникают сложности при проведении измерений в труднодоступном и ограниченном

пространстве, либо они в принципе не применимы для готовых изделий.

В рамках создания нового прибора, позволяющего контролировать внутренние напряжения в покрытиях, нанесенных на готовые изделия, магнитным методом без разрушения материала покрытия, было изучено влияние напряжений в никелевых пластинках на величину и топографию поля, создаваемого постоянными магнитами с различными геометрическими параметрами.

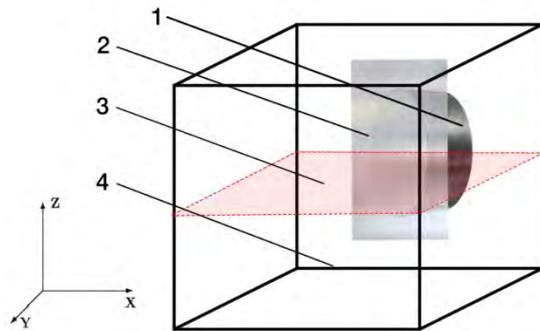
Исследование проводилось с помощью системы трехкоординатного позиционирования, включающей крепление для магнита и никелевой пластинки, а также датчик для измерения величины магнитного поля (рисунок 1).



- 1 – направляющие движения платформы,  
2 – платформа с креплением для магнита и  
никелевой пластинки, 3 – направляющие  
движения датчика, 4 – датчик, 5 – кабель связи,  
6 – ПК, 7 – магнит, 8 – никелевая пластинка

Рисунок 1 – Схема устройства установки  
для исследования магнитных полей

Измерение магнитного поля проводилось точно в пространстве  $10 \times 10 \times 10$  мм над магнитом с дискретностью измерений 0.5 мм. Данные записывались, а затем обрабатывались с помощью пакета программ Matlab. Для того, чтобы представить графически топографию магнитного поля, из трехмерного пространства значений выбирался срез таким образом, чтобы одно из значений матрицы-среза было также и максимальным значением величины магнитного поля во всем пространстве измерений над магнитом. Схема расположения среза в пространстве измерений представлена на рисунке 2.



1 – магнит, 2 – никелевая пластинка,  
3 – срез по которому строилась топография,  
4 – пространство измерений магнитного поля

Рисунок 2 – Срез значений в пространстве измерений величины поля для построения топографии

Всего было исследовано 4 магнита и 4 никелевые пластинки, имитирующие покрытие. Напряжения в пластинках создавались путем прокатки. Максимальные величины магнитных полей, измеренные в точке непосредственно над каждым из магнитов, представлены в таблице.

**Максимальные величины магнитных полей**

Магнит	Толщина пленки и величина прокатки			
	205 мкм 10 %	300 мкм 20 %	400 мкм 0 %	400 мкм 40 %
Величина магнитного поля, мТл				
№1	440	320	210	280
№2	155	150	90	135
№3	5,2	5,3	1,8	5,2
№4	2,6	2,7	0,85	2,5

Как видно из таблицы, влияние внутренних напряжений на величину поля, создаваемого постоянным магнитом, максимально при внесении в него пластинки с толщиной 400 мкм с уровнем прокатки 40 %. Для сравнения на рис. 3 и 4 представлены топографии магнитных полей над пластинками с толщиной 400 мкм и уровнем прокатки 0 % и 40 %.

По осям X и Y отложено расстояние от магнита центра, по оси Z – величина магнитного поля в точке. Топография представлена в виде трехмерного графика, поскольку использование отдельной оси координат для представления величины магнитного поля является более наглядным способом, нежели двухмерный график с изолиниями.

Полученные в ходе исследования топографии позволяют установить, что на образцах, имеющих внутренние напряжения, ослабление поля гораздо меньше, чем на отожженных образцах. Так, например, для образцов с толщиной 400 мкм

видно, что ослабление поля на отожженном образце в три раза больше, чем на образце с прокаткой 40 % в случае магнита № 4. С другими магнитами этот эффект также наблюдается, однако в меньшей степени. В случае с никелевыми пластинками толщиной 205 мкм и 300 мкм также можно наблюдать, что влияние внутренних напряжений тем больше, чем слабее поле магнита, в котором находится пластинка. Как видно из таблицы, в случае с сильными магнитами, толщина оказывала наибольшее влияние на величину поля, а в случае с слабыми – напряжения. Это говорит о низкой магнитной проницаемости образцов, имеющих внутренние напряжения и большей концентрации поля в отожженных образцах.

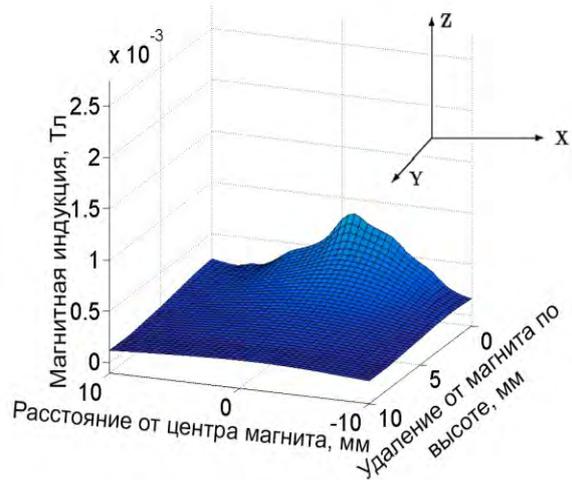


Рисунок 3 – Топография поля магнита №3 под никелевой пластинкой 400 мкм 0 %

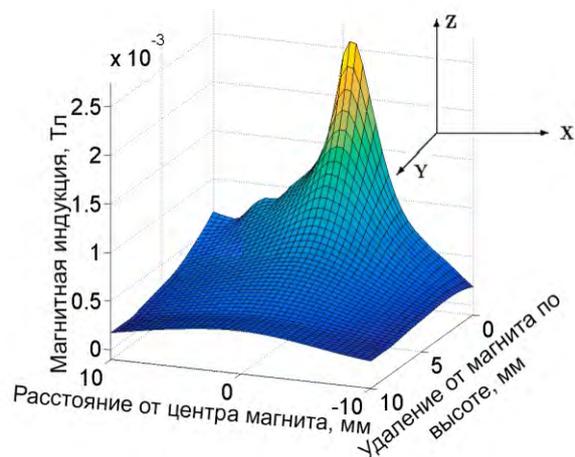


Рисунок 4 – Топография поля магнита №4 под никелевой пластинкой 400 мкм 40 %

УДК 681.51: 617.577-089.873

## МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ПАЛЬЦЕВ РУК ДЛЯ ПРОТЕЗНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Вонсевич К.П., Безуглый М.А.

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»  
Киев, Украина*

Повседневная жизнь включает различные типы взаимодействий между людьми, равно, как и между людьми и предметами. Для успешного осуществления большинства ежедневных бытовых задач огромную роль играет присутствие здоровой верхней конечности. А в случае выполнения высокоточных действий, связанных с мелкой моторикой – наличие нормально функционирующей кисти и пальцев является необходимостью.

К сожалению, согласно статистике [1], количество травм, связанных с ампутациями верхней конечности или её отдельных элементов, так же, как и врождённых аномалий их развития, является значительным по всему миру. Возможным решением, которое способно частично возместить функции травмированных элементов руки человека является применение тяговых или бионических протезных устройств [2; 3].

Тяговые протезы, механически приводимые в действие в следствии движения уцелевшей части конечности пациента, имеют не большой набор возможностей, и в большинстве случаев позволяют исполнять лишь один тип хватательного движения. Этот вариант протезов применяется, в основном, в случае частичных ампутаций или ампутаций кисти, и может быть изготовлен даже с помощью бюджетных технологий FDM 3D-печати, что делает его привлекательным решением для рядового пользователя.

В отличие от тяговых, бионические протезные устройства (БП) имеют значительно большее количество функциональных возможностей и типов исполняемых движений. В общем случае, БП используют биологический сигнал от тела пациента, разнообразные измерительные устройства и датчики, что в комплексе с приводными механизмами позволяют осуществлять целый набор независимых движений искусственной конечности, обеспечивать регуляцию силы сжатия протезом и возможное естественное управление его работой.

К сожалению, наличие всех преимуществ в бионическом протезе влияет так же на его сложность и стоимость. Как следствие, создание эффективной искусственной кисти или пальцев, доступных для каждого ампутанта, и не уступающих уже имеющимся коммерческим

протезные устройства – является открытым и важным заданием.

Одним из самых значительных компонентов, на пути достижения хорошей производительности и стоимости штучной конечности является блок управления (БУ) протезного устройства. В качестве биологического базиса для БУ, обычно используется несколько типов управляющих сигналов, таких как: электромиографический (EMG), ультразвуковой, нейронный, сигнал от мозга человека и т.д. Использование поверхностного sEMG сигнала, является наиболее традиционным для протезного применения. При этом, распознавание движений отдельных пальцев с помощью sEMG – комплексная и сложная задача, зависящая от многих факторов и требующая выполнения целого набора критериев.

Прежде всего, измеренный EMG сигнал должен быть усилен, отфильтрован, выпрямлен и сглажен для возможности его дальнейшего анализа и использования в БУ. После чего необходимо определить характеристики полученного сигнала, которые в общем случае можно разделить на четыре основные категории: временные (TDF), характеристики временных рядов (TSD), частотные (FD), частотно-временные (FD), и лишь после этого провести классификацию с помощью одного из методов машинного обучения (ММО). В качестве ММО, при классификации EMG сигнала могут применяться различные методики, такие как: линейный дискриминантный анализ (LDA), метод опорных векторов (SVM), искусственных нейронных сетей (ANN), размытой логики (Fuzzy Logic) и др.

Точность классификации напрямую зависит от количества и качества входных параметров, которые во многом определяются измерительной системой устройства и количеством её рабочих каналов. Использование многоканальных систем измерения позволяет повысить способность распознавания БУ и создавать, картирование типов исполняемых движений. Однако, это так же увеличивает сложность протезного устройства, возможность его автономного использования и конечную цену.

В данной работе авторами было предложено метод распознавания 6 типов движений пальцев, на основании одноканальной измерительной EMG-системы, четырех временных (TDF) характеристик и относительно простой искусственной нейронной сети.

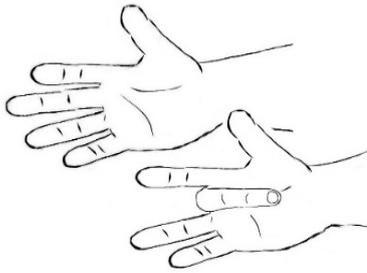


Рисунок 1 – Исследуемое движение на примере сгибания III пальца кисти

Тестирование метода проводилось на 6-ти здоровых добровольцах возрастом от 10 до 50-ти лет мужского и женского пола. В качестве исследуемых движений было предложено отдельное сгибание II-V пальцев кисти, а также одновременной сгибание III-V и II-V пальцев (см. рисунок 1).

Измерительные электроды размещались в зоне предплечья левой руки, относительно мышц Flexor Digitorum Superficialis, а референтный электрод – на локтевой кости той же руки. Алгоритмом измерений предусматривалось проведение пяти итераций на каждый тип движения, во временном интервале 250 мс на каждую попытку. Запись EMG сигнала проводилась с помощью специально созданной микроконтроллерной системы на основании готового одноканального миографического модуля SEN-11776 производства SparkFun Electronics.

В качестве выходных параметров EMG сигнала, использованных при классификации, было предложено 4 временных характеристики, а именно: трапециевидный интеграл (Int), максимальное значение амплитуды (P), дисперсия (VAR) и среднее абсолютное отклонение (MAD) [4].

Классификация предложенных движений проводилась с помощью искусственной нейронной сети (ИНС), созданной в среде Matlab's Neural Network Toolbox v. 8.5. производства The MathWorks Inc. Созданная нейронная сеть прямого распространения имеет в своей структуре (рис. 2) два скрытых, один входной и один выходной слой, обучена с помощью метода обратного распространения ошибки по алгоритму Левенберга-Макрвардта и позволяет оценивать категорию каждого типа заданных движений на основании четырех эмпирических входов описанных выше. В каждом из скрытых слоёв ИНС имеется по 20 нейронов, а в качестве их функции активации (ФА) и ФА выходного слоя выбрано тангенциальную сигмоидальную и линейную передаточную функции соответственно.

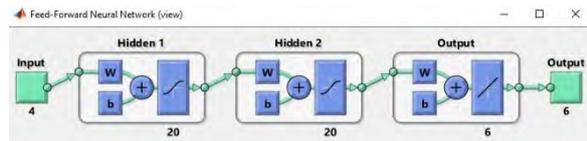


Рисунок 2 – Структура предложенной модели нейронной сети

Точность классификации предложенной нейронной сети, согласно ROC-кривой составляет 95,44% и может быть увеличена при дальнейшем обучении модели на тренировочной выборке с более значительным количеством добровольцев.

В этой работе авторами были описаны основные типы протезов, применяемые в случае частичной ампутации верхних конечностей и проанализированы некоторые особенности их эксплуатации и реализации.

Авторами были так же определены критерии построения блоков управления бионических протезных устройств на основании EMG сигналов и предложено собственный метод распознавания шести типов движений пальцев кисти.

Предложенный алгоритм классификации миографических сигналов является достаточно эффективным и позволяет производить оценку сложных типов движений, используя при этом лишь одноканальную измерительную систему, четыре входных параметра и нейронную сеть прямого распространения.

Перечисленные выше факторы позволяют говорить о дальнейшей возможной имплементации предложенного метода в систему управления автономных бионических протезов кисти или отдельных пальцев с последующим уменьшением её сложности и стоимости.

#### Литература

1. Zuniga, J.M, Carson, A.M, Peck, J.M. The development of a low-cost three-dimensional printed shoulder, arm, and hand prostheses for children // *Prosthetics and Orthotics International*. – 2017. – № 41. – С. 205–209.
2. Arabian, A, Varotsis, D, McDonnell, C. Global social acceptance of prosthetic devices // *2016 IEEE GHTC*. – 2016. – С. 563–568.
3. Postema, S.G, Bongers, R.M, Reneman, M.F. Functional Capacity Evaluation in Upper Limb Reduction Deficiency and Amputation: Development and Pilot Testing // *Journal of Occupational Rehabilitation*. – 2017. – С. 1-12.
4. Вонсевич К.П, Безуглий М.О, Гапонюк А.О. Інформаційно-вимірювальна система міографу біонічного протезу кінцівки // *Перспективні технології та прилади*. – 2017. – № 10. – С. 32–37.

УДК 621.792

## ПАТОГИСТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ УСТАНОВКЕ ВИНТОВОГО СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ СПОСОБОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Киселев М.Г., Монич С.Г., Лапутина Д.Г.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Наибольшее применение титановые имплантаты нашли в стоматологии для устранения дефектов зубных рядов. На условия вживления, т.е. интеграции имплантата в организме человека, существенное влияние оказывают характеристики состояния его поверхности: параметры ее шероховатости, смачиваемость биологическими жидкостями, адсорбционная способность и емкость при взаимодействии с ними, а также прочность соединения с костной тканью [1–2, 5–7]. Значения этих характеристик и диапазон их варьирования зависят от применяемой технологии окончательной обработки (модифицирования) поверхности имплантата.

На основе анализа существующих способов модифицирования поверхности титановых стоматологических имплантатов установлено, что эффективным является способ, позволяющий получить на ней частично регулярный микрорельеф с использованием энергии электрических разрядов, представляющий собой совокупность закономерно расположенных и не перекрывающих друг друга лунок, близких по форме к сферической (рисунок 1), основанный на локализации места воздействия на нее электрического разряда и управляемого ее перемещения на величину требуемого шага расположения лунок за промежуток времени между двумя последовательными разрядами [3–4, 8–10].

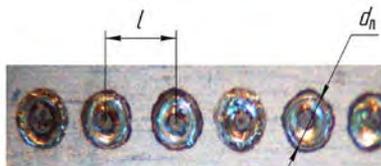


Рисунок 1 – Фотография (увеличение  $10\times$ ), полученного на поверхности титанового стоматологического имплантата частично регулярного микрорельефа (б)

На основе обобщенного анализа результатов предшествующих исследований [8, 9] влияния режимов электроэрозионного модифицирования поверхности образцов титановых имплантатов на шероховатость и характеристики ее состояния, положительно влияющих на протекание процесса интеграции имплантата, определены рациональные режимы и условия выполнения обработки, при которых модифицированная поверхность обладает наибольшими значениями исследуемых характеристик ее состояния. В частности, обработку следует осуществлять проволочным электродом-инструментом диаметром 0,2–0,3 мм из сплава

ВТ1-0; напряжение накопительного конденсатора должно составлять 75–80 В при его емкости 350–400 мкФ; использовать прямую полярность при коэффициенте расположения лунок  $l/d_n = 1,0–1,1$ ; в качестве диэлектрической жидкости применять дистиллированную воду.

Экспериментально установлено, что применение электроэрозионного модифицирования поверхности образцов титановых имплантатов повышает по сравнению со струйно-абразивной обработкой величину свободной энергии поверхности в 3 раза; смачиваемость плазмой крови человека в 2,2 раза; удельную емкость по отношению к ней в 1,8 раза; адсорбционную способность при взаимодействии с раствором человеческого сывороточного альбумина в 5 раз, прочность соединения с имитатором костной ткани в 5,7 раза.

Для определения возможности применения имплантатов с модифицированной поверхностью в клинических условиях необходимо провести патогистологические исследования костной ткани при установке таких имплантатов. С этой целью по разработанной технологии электроэрозионного модифицирования были обработаны поверхности титановых винтовых стоматологических имплантатов производства ООО «Верлайн» (рисунок 2).



Рисунок 2 – Фотография винтовых стоматологических имплантатов производства ООО «Верлайн»

Патогистологические исследования были проведены на четырех самцах кроликов породы Шиншилла одного возраста и массы тела. Данные животные находились на стандартном рационе питания в виварии центральной научно-исследовательской лаборатории (ЦНИЛ) учреждения образования «Белорусский государственный медицинский университет».

Экспериментальные исследования осуществляли в строгом соответствии с современными принципами биоэтики.

Оперативное вмешательство по установке дентального имплантата экспериментальному объекту – кролику выполняли в асептических условиях, под внутривенным наркозом. В области тела нижней челюсти по нижнему краю проводили разрез мягких тканей, скелетировали кортикальную пластинку и формировали ложе для дентального имплантата. В сформированное ложе вводили имплантат, при этом двум кроликам устанавливали имплантаты с полированной поверхностью, а двум – с модифицированной.

На 7-е сутки после операции животных выводили из эксперимента и осуществляли забор материала для патогистологического исследования.

В микропрепаратах у имплантата с полированной поверхностью на 7 сутки наблюдения в области контакта с костной тканью присутствует фиброзная ткань, с признаками некроза и обширными кровоизлияниями (рисунок 3).



1 – имплантат; 2 – остеобласты; 3 – губчатая костная ткань; 4 – кровеносные сосуды

Рисунок 3 – Морфологическая картина на 7-е сутки при установке имплантата с полированной поверхностью (микрофотография – увеличение 10<sup>x</sup>)

В микропрепаратах у имплантатов с модифицированной поверхностью серии на 7 сутки наблюдения определяется новообразованная костная ткань на всем протяжении витков имплантата (рисунок 4), уменьшается зону травматического некроза костной ткани, снижает избыточное давление имплантата на кость и равномерно распределяет нагрузку, что снижает развитие осложнений.



1 – имплантат; 2 – остеобласты; 3 – губчатая костная ткань; 4 – кровеносные сосуды

Рисунок 4 – Морфологическая картина новообразованной кости на 7 сутки при установке имплантата с модифицированной поверхностью (микрофотография – увеличение 20<sup>x</sup>)

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения имплантатов с модифицированной поверхностью в клинических условиях.

#### Литература

1. Вильямс, Д.Ф. Имплантаты в хирургии / Д.Ф. Вильямс, Р. Роуф ; пер. с англ. Е.В. Колпакова. – М. : Медицина, 1978. – 552 с.
2. Does titanium surface treatment influence the bone-implant interface SEM and histomorphometry in a 6-month sheep study / G. Hure [et al.] // The Intern. J. of Oral a. Maxillofacial Implants. – 1996. – Vol. 11, № 4. – P. 506–511.
3. Porowate implanty korundowe jako nosniki antybiotyku / J. Polesinski [et al.] // Proceedings of III Symposium IOP 2001, Bialystok, 25–27 June 2001. – Bialystok, 2001. – P. 193–201.
4. Jarcho, M. Calcium phosphate ceramics as hard tissue prosthetics / M. Jarcho // Clinical Orthopaedics a. Related Research. – 1981. – Vol. 157, № 6. – P. 259–278.
5. Browne, M. Surface modification of titanium alloy implants / M. Browne, P. J. Gregson // Biomaterials. – 1994. – Vol. 15, № 11. – P. 894–898.
6. Kramer, K.-H. Implants for surgery – a survey on metallic materials / K.-H. Kramer // Materials for Med. Engineering. – 1999. – Vol. 2. – P. 9–29.
7. Киселев, М.Г. Экспериментальные исследования смачиваемости и адсорбционной способности титановых имплантатов / М.Г. Киселев, В.В. Савич, Т.П. Павич // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология». – Гомель, 2005. – С.80-81.
8. Киселев, М.Г. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, П.С. Богдан, С.Г. Монич // Наука и техника. – 2013. – №2. – С.23-27.
9. Влияние методов обработки поверхности титановых имплантатов на физико-химические и биохимические характеристики их поверхности / М. Г. Киселев [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 70–75.
10. Киселев, М. Г. Исследование явления переноса материала с инструмента на обрабатываемую поверхность имплантата при его электроэрозионной обработке с ультразвуком / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, В.А. Борисов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : VII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 сент. 2012 г.: сб. материалов : в 3 кн. / Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2012. – Кн. 2. – С. 88–93.

## СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА МИКРОСХЕМЕ DDS AD9833 ДЛЯ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Петухов И.Б., Кипарин И.Н.

ОАО «Планар-СО»

Минск, Республика Беларусь

В установках присоединения проволочных или ленточных выводов изделий электронной техники с использованием ультразвука, применяется ультразвуковая система, включающая ультразвуковой преобразователь (УЗП) и ультразвуковой генератор (УЗГ). УЗГ представляет собой электромеханический колебательный контур с высокой добротностью (порядка 600-800) на основной резонансной частоте и имеющий несколько паразитных резонансных частот. При комплексном воздействии на УЗП (изменение механической нагрузки, изменение подводимой электрической мощности), изменяется его резонансная частота. Экспериментально выявлено, что для оптимальной работы УЗП и передачи максимальной мощности от УЗГ в УЗП, необходимо подводить электрический сигнал синусоидальной формы (или электрический сигнал максимально приближенный к синусоидальной форме), соответствующий резонансной частоте УЗП.

Структурная схема ультразвуковой системы приведена на рисунке 1.

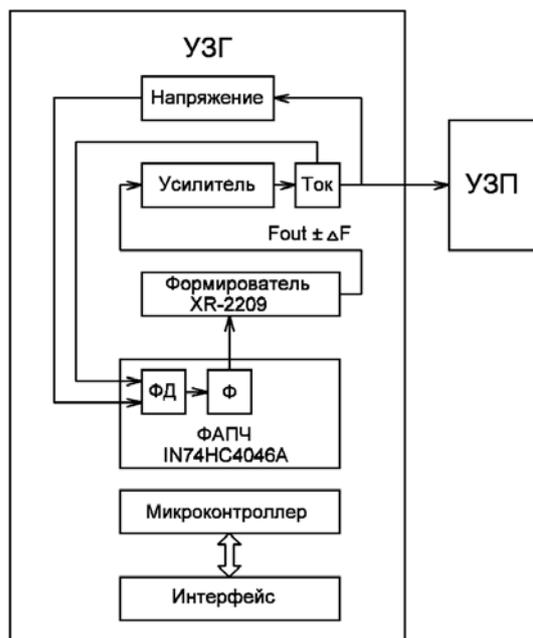


Рисунок 1 – Структурная схема ультразвуковой системы

Работу на резонансной частоте УЗП обеспечивает УЗГ. УЗГ состоит из следующих модулей: система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), имеющая фазовый детектор (ФД) с петлевым фильтром (Ф) и генератор,

управляемый напряжением XR-2209 (ГУН); формирователь сигнала синусоидальной формы (Формирователь); усилитель; микроконтроллер. ФАПЧ обеспечивает на выходе усилителя УЗГ нулевой фазовый сдвиг между напряжением и током. Формирователь обеспечивает формирование напряжения синусоидальной формы в рабочем диапазоне частот с минимальными гармоническими искажениями. Усилитель обеспечивает усиление синусоидального сигнала по мощности. Блок микроконтроллера организует согласованную работу модулей и обеспечивает возможность управления УЗГ посредством интерфейса с пользователем и дополнительным оборудованием.

Существуют разные способы формирования синусоидального напряжения. Наиболее практичным способом является использование специализированных интегральных микросхем, формирующих сигналы синусоидальной или треугольной формы. При использовании напряжения треугольной формы, требуется дополнительный формирователь треугольной формы выходного напряжения в синусоидальную форму. Традиционно используются микросхемы типов MAX038 [1] – формирователь синусоидального и треугольного напряжения и XR-2209 [2] – формирователь треугольного напряжения. На сегодняшний день эти микросхемы малодоступны либо очень дороги для мелкосерийного выпуска продукции на их основе. Это связано с сокращением и прекращением выпуска этих микросхем. Отметим, что выше перечисленные микросхемы формируют выходной сигнал непосредственно на рабочей частоте. Для формирования рабочей частоты используются два частотозадающих элемента – резистор и конденсатор.

Осуществляя поиск функциональных аналогов выше перечисленных специализированных микросхем, выбор был сделан в пользу другого перспективного класса микросхем – микросхем прямого цифрового синтеза (DDS). Широкий ассортимент микросхем DDS предлагает американская компания Analog Devices. Для наших задач наиболее подходящей оказалась микросхема типа AD9833. Ввиду принципиально иного принципа формирования выходного синусоидального напряжения и необходимостью инициализации данной микросхемы микроконтроллером, потребовалось по-другому задействовать эту микросхему в схеме петли ФАПЧ УЗГ. Принцип работы на основе

накапливающего сумматора применен в микросхеме AD9833 [3] и подробно расписан в статье [4]. На рисунке 2 приведен принцип работы микросхемы DDS из статьи [4]. На рисунке 3 приведена структурная схема ультразвуковой системы с использованием в качестве формирователя напряжения синусоидальной формы микросхемы AD9833.

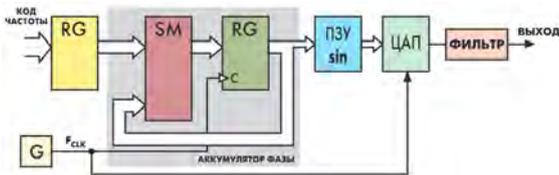


Рисунок 2 – Принцип работы микросхемы DDS

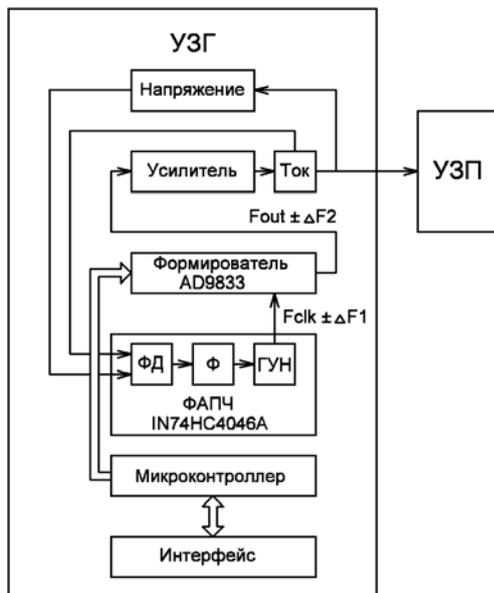


Рисунок 3 – Структурная схема ультразвуковой системы с использованием в качестве формирователя напряжения синусоидальной формы микросхемы AD9833

При сравнении структурных схем, приведенных на рисунках 1 и 3 заметно, что на рисунке 1 управление формирователем на микросхеме XR-2209 осуществляет только фильтр (Ф) системы ФАПЧ. На рисунке 3 управление формирователем на микросхеме AD9833 осуществляет ГУН системы ФАПЧ на микросхеме IN74HC4046A, а также микроконтроллер. Микроконтроллер устанавливает среднюю рабочую частоту, инициализируя формирователь AD9833, а ГУН системы ФАПЧ осуществляет подстройку выходной частоты. Такой способ

формирования синусоидального напряжения позволяет гибко перестраивать рабочую частоту формирователя синусоидального напряжения в рабочем диапазоне.

При конкретной реализации формирователя синусоидального напряжения на микросхеме DDS AD9833 для системы ФАПЧ (см. рисунок 3) использовались ГУН и фазовый детектор микросхемы ФАПЧ типа IN74HC4046A [5]. Среднее значение выходной частоты ГУН составило 18470 кГц. Микросхема цифрового синтеза типа AD9833 формирует синусоидальное напряжение с низким уровнем гармоник (THD менее – 56 Дб) в широком диапазоне формируемых частот [3]. Выходное амплитудное значение напряжения микросхемы AD9833 в диапазоне от 50 до 200 кГц составило 0,6 В с постоянной составляющей. Для нормирования выходного напряжения и устранения постоянной составляющей использовался активный фильтр нижних частот второго порядка с частотой среза по уровню минус 3 Дб равной 477 кГц. Коэффициент усиления фильтра по переменному току составил 4,7.

В отличие от способа управления выходной частотой AD9833 микроконтроллером, реализованный способ управления позволяет производить дополнительное управление выходной частотой от ГУН системы ФАПЧ. Частота ГУН является тактирующей для микросхемы AD9833. Относительное отклонение выходной частоты формирователя синусоидального напряжения от среднего значения точно соответствует относительному отклонению от среднего значения выходной частоты ГУН. Такое решение позволяет резко снизить требования к производительности микроконтроллера, что в результате позволяет значительно упростить и удешевить формирователь синусоидального напряжения УЗГ.

#### Литература

1. MAX038 High-Frequency Waveform Generator <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX038.pdf>
2. XR-2209 Monolithic Function Generator <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/exar/XR2209v202.pdf>
3. AD9833 Programmable Waveform Generator <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9833.pdf>
4. Леонид Ридико, DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. – 2001. – №7. – [http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2001\\_07\\_50.pdf](http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_07_50.pdf)
5. IN74HC4046A PHASE-LOCKED LOOP <http://www.bms.by/eng/spec/PDF/74HC4046e.pdf>

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПОЗИЦИОНЕР

Рыжевич А.А.<sup>1</sup>, Балыкин И.В.<sup>1,2</sup>, Машенко А.Г.<sup>1</sup>, Железнякова Т.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Во многих случаях для проведения оптических исследований и измерений необходимо линейно перемещать образец, оптическую головку или измерительный узел с определенной скоростью и точностью. С этой целью в Институте физики НАН Беларуси была разработана концепция одномерного электромеханического позиционера (ЭМП) на основе реверсивного двигателя переменного тока (рисунок 1).

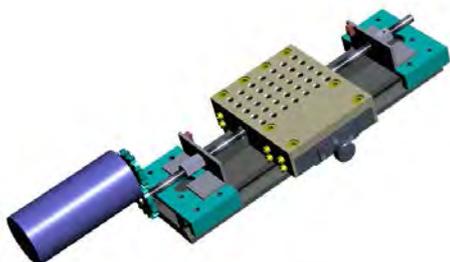


Рисунок 1 – 3D-модель ЭМП

ЭМП состоит из стандартного оптического рельса, электродвигателя, вращающего посредством шестеренной передачи резьбовую шпильку, и каретки. Каретка предназначена для свободного плавного поступательного движения образцов вдоль направляющей, в качестве которой выступает оптический рельс типа «ласточкин хвост». Изготовленная нами универсальная каретка подходит для всех видов оптических рельсов, выпускавшихся на территории бывшего СССР. До настоящего времени в Институте физики НАН Беларуси и в других научных и научно-технических организациях сохранилось большое количество пригодных для работы оптических рельсов данного вида, которые являются гораздо более надежными, прочными и устойчивыми, нежели малогабаритные и нежесткие рельсы, изготавливаемые в таких фирмах, как, например, Thorlabs (США) или Standa (Литва). Конструкция универсальной каретки позволяет ей перемещаться без значительных прилагаемых усилий даже по оптическим рельсам с довольно грубо обработанными боковыми сторонами. В конструкции каретки отсутствуют детали, подверженные разрушению при воздействии мощного импульсного светового излучения и температур вплоть до 250°С. На верхней поверхности изделия предусмотрены отверстия с резьбой М6, унифицированные по расположению с наиболее широко распространенными механическими узлами для крепления и юстировки оптических элементов, в том числе с комплектом «М».



Рисунок 2 – Универсальная оптическая каретка

Изготовленный нами ЭМП на базе реверсивного двигателя РД-09 (рисунок 3) позволяет поступательно перемещать исследуемый или обрабатываемый образец с постоянной скоростью в диапазоне 1,5 м.



Рисунок 3 – Электромеханический позиционер с реверсивным двигателем РД-09

ЭМП может быть укомплектован и шаговым двигателем. В этом случае позиционирование каретки может осуществляться как вручную, так и автоматически. Электронная часть изготовленного нами ЭМП с шаговым двигателем была спроектирована на базе аппаратно-программного комплекса для построения систем автоматики и робототехники «Arduino UNO R3» (рисунок 4).

Такой выбор был обусловлен универсальностью и относительной дешевизной платы «Arduino», а также существованием свободно распространяющихся программных средств GRBL, позволяющих использовать имеющий широкое распространение в системах числового программного управления G-код (стандарт ISO 7). G-коды посылаются с ПК на

«Arduino» через встроенный в плату USB-UART преобразователь. В качестве привода, вращающего резьбовую шпильку, нами был использован шаговый электродвигатель 42BYGHW208 форм-фактора NEMA17 с разрешением 200 шагов на оборот (рисунок 5).



Рисунок 4 – Плата контроллера Arduino UNO R3 (FZ0038)



Рисунок 5 – Шаговый двигатель 42BYGHW208

Для управления шаговым электродвигателем была задействована микросхема-драйвер A4988 (рисунок 6), выпускаемая «Allegro microsystems». Подключение драйвера к «Arduino» осуществлялось посредством платы расширения «CNC Shield V3» (рисунок 7), позволяющей подсоединять к комплексу управления до 4 двигателей. Источником питания для двигателей служил стандартный компьютерный блок питания, рассчитанный на мощность до 300 Вт.

УДК 621.762

## УНИКАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ПРИБОРОВ

Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Металлургические аддитивные технологии (далее - АТ) с начала 2010-х годов успешно вошли в производство аэрокосмической и медицинской техники [1] для получения малых серий деталей сложной формы из титановых, жаростойких и

алюминиевых сплавов. По мере освоения производства и применения таких деталей выявлялись как недостатки, так и достоинства АТ. К первым относятся: высокие требования к узкому грансоставу исходных порошков (как правило,



Рисунок 6 – Мотор-драйвер шагового двигателя A4988 (EC141225)

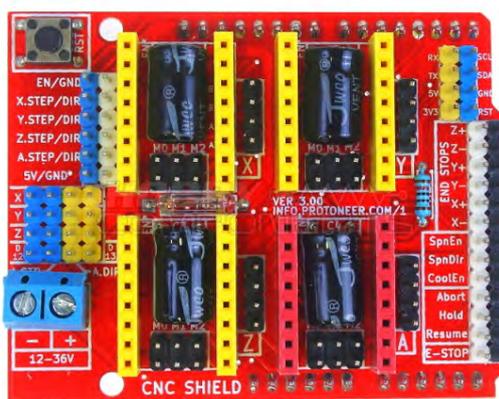


Рисунок 7 – ЧПУ shield V3 (13233112)

Управление трансляцией системы осуществлялось с использованием традиционных для станков с числовым программным управлением G-кодов, передаваемых через USB-UART преобразователь на «Arduino». Для интерпретации G-кодов на «Arduino» был загружен программный пакет GRBL. В процессе конфигурирования системы G-коды отправлялись на плату вручную при помощи G-code sender.

Построенная нами система позволила достичь точности перемещений вдоль рельса до 0,25 мм, при этом процесс перемещения каретки может быть программно совмещен с другими экспериментальными операциями.

10–30 мкм) и к их сферичности [2], следствием чего является высокая цена порошков металлов и сплавов для АТ; для тонкостенных изделий необходимо выстраивать поддержки, которые затем надо удалять; необходимо в любом случае отделять построенную деталь от технологического поддона; габариты изделий ограничены размерами рабочей зоны используемой установки (на сегодняшний день для подавляющего большинства не более 500-800 мм), поскольку построение ведется в атмосфере аргона либо вакуума; для приемлемой механической прочности, в первую очередь – усталостной, полученные АТ детали необходимо подвергать дополнительной обработке температурой и давлением – ГИП (горячему изостатическому прессованию). В то же время возможности АТ дают конструктору простор для фантазий и инструмент для реализации ранее неисполнимого. Целью данной работы является анализ тенденций в конструировании эффективных оптимальных конструкций деталей для их последующего производства современными методами АТ.

Все АТ используют компьютерные модели деталей, что уже на ранней стадии проектирования позволяет оптимизировать конструкцию и избежать грубых ошибок при их построении. В то же время АТ, в сочетании с многочисленными современными пакетами ПО, позволяющими эффективно вести расчеты прочности деталей машин и приборов, дают конструктору возможность удалять «лишний» металл из ненагруженных зон и строить оптимальные конструкции по методу, получившему в АТ название «био-дизайн» [3–5].

Компания Airbus в сотрудничестве с дочерней фирмой The Living компании Autodesk приступила к производству АТ самого крупногабаритного элемента конструкции самолета на сегодняшний день (рисунок 1) [5]. Это переборка, отделяющая пассажирский салон от служебного отсека на авиалайнерах Airbus A320. Переборка является несущим элементом для установки откидных кресел борпроводников, что требует высокой прочности и, как результат, обуславливает ее высокий вес. Переборка, полученная АТ из титанового сплава, на 45 % легче существующих аналогов, сохраняя при этом необходимую прочность. Переборка имеет бионическую структуру, позволяющую снизить вес на 45 % или порядка 30 кг.

Успешное применение био-дизайна в авиации привело его вместе с АТ и на землю. Компания Altair разработала футуристическую модель рамы легкого мотоцикла по данному принципу (рисунок 2) [6].

АТ дают возможность строить и другие облегченные крупногабаритные конструкции, более близкие к традиционным, сборным из отдельных деталей, но цельные (рисунок 3) [7].



Рисунок 1 – Био-дизайн конструкции переборки лайнера Airbus A320 [5], полученной АТ из титанового сплава



Рисунок 2 – Био-дизайн рамы легкого мотоцикла, полученной АТ из титанового сплава [6]

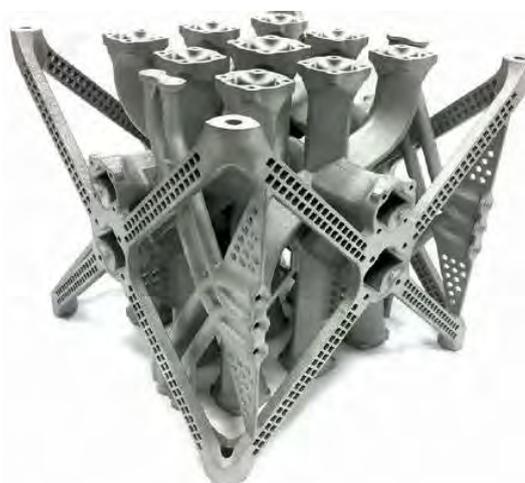


Рисунок 3 – Облегченная цельная опора [7], полученная АТ из алюминиевого сплава

Как видно из рисунка 3, изготовление данной конструкции традиционными методами в принципе невозможно, а подобный аналог состоял бы из множества отдельных деталей, соединяемых сваркой либо винтовыми соединениями, метизами и т.п.

Еще одно важное и полезное преимущество АТ – возможность формировать каналы

охлаждения любой формы и сечения на поверхности детали (рисунок 4) [8] или в ее теле (рисунок 5) [9].



Рисунок 4 – Сопло и камера сгорания малогабаритного ЖРД, полученная АТ из жаропрочного сплава Inconel 718 с каналами охлаждения жидким топливом на поверхности сопла и камеры сгорания [8]



Рисунок 5 – Лопатка стационарного ТРД, полученная АТ из жаропрочного сплава Inconel 725 с каналами воздушного охлаждения в теле лопатки [8]

Характеристики созданного канадской компанией Burloak Technologies, Inc. ЖРД (рисунок 4) неизвестны, но явно выше, чем у традиционной конструкции. Германская компания Сименс уверенно заявляет, что за счет оптимизации формы и сечения каналов воздушного охлаждения лопатки стационарной газовой турбины Siemens SGT-400 мощностью 13 МВт удалось повысить скорость вращения до 13000 оборотов в минуту и поднять рабочую температуру до 1250 °С [8], что ранее было невозможно с лопатками из даже монокристаллического жаропрочного сплава.

Безусловно, такие возможности АТ не остались без внимания и конструкторами теплообменных устройств, которые успешно создают сложные

трехмерные и плотноупакованные энергоэффективные цельные конструкции. Так специалистами британской фирмы 3T RPD Ltd спроектирован и изготовлен прототип спирального высокотемпературного теплообменника (рисунок 6) [7] из жаропрочного сплава.



Рисунок 6 – Спиральный теплообменник [7], полученный АТ из жаропрочного сплава

Не менее интересна конструкция интеркуллера опытного двигателя спортивного автомобиля, полученная АТ в Swansea University (Великобритания) совместно с фирмой Renishaw (Великобритания) (рисунок 7) [10]. Конструкция успешно прошла испытания в ходе гонок.



Рисунок 7 – Интеркуллер двигателя спортивного автомобиля [7], полученный АТ из алюминиевого сплава

Как видно из изложенного выше, АТ позволяют вырабатывать сложные трехмерные и крупногабаритные металлические конструкции, обладающие не только уникальным специфическим дизайном, недостижимым традиционными технологиями, но и получать цельные конструкции, заменяющие сборочные единицы, состоящие из десятков и даже сотен отдельных деталей, соединяемых сваркой, пайкой или с помощью метизов.

Наиболее ярко это удалось продемонстрировать французской фирме Renault Trucks [11]. Оригинальный четырехцилиндровый дизельный двигатель Рено DT-15 Euro 6 - состоит из **841 детали** (рисунок 8).

Новая конструкция двигателя состоит из менее чем **200 деталей** (рисунок 9), причем масса уменьшена на 120 кг – более, чем на 25% по сравнению с оригиналом.



Рисунок 8 – Оригинальный четырехцилиндровый дизельный двигатель Рено DT-15 Euro 6 [11]



Рисунок 9 – Четырехцилиндровый дизельный двигатель Рено DT-15 Euro 6, произведенный с помощью АТ [11]

Прототип двигателя, произведенный с помощью АТ, прошел успешные стендовые 600-часовые испытания. Следует отметить другое техническое решение группы АТ компании Renault Trucks – рычаг привода клапана (рис.10), который уже внедрен в производство [11].

Как хорошо видно из рисунка 10, ажурная конструкция АТ-рычага выстроена по зонам сосредоточения максимальных напряжений и имеет массу в разы меньше традиционной.

До недавнего времени в металлургических АТ считалось возможным одномоментное построение заготовки только из порошка одной марки и состава [1-11]. Заслуживают внимания в этом плане результаты, изложенные в работе [12], в которой показаны перспективы и техническая возможность построения полиметаллических изделий, изготовленных с использованием АТ с дискретным, либо плавным (градиентным) изменением состава, структуры и свойств материалов. На рисунке 11 представлен общий вид «слоеной» демонстрационной детали, построенной из порошков меди и серебра [12].



Рисунок 10 – Стальной рычаг привода клапанов дизельного двигателя Рено DT-15 Euro 6, произведенный с помощью АТ (на переднем плане) в сравнении с традиционной конструкцией (на заднем плане) [11]

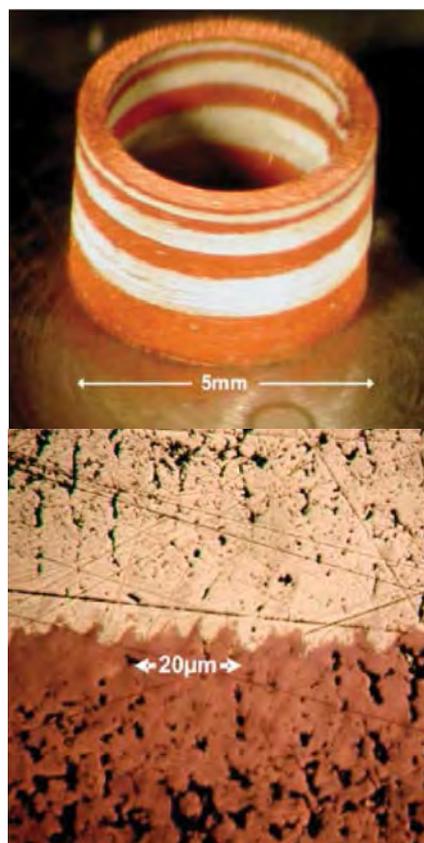


Рисунок 11 – Модельная деталь, полученная АТ из порошков серебра и меди (вверху), и граница раздела между слоями различных металлов (внизу) [11]

Следует отметить, что специалистами NASA уже получен прототип электродвигателя, статор которого получен АТ из слоев диэлектрика и проводника и (или) из слоев магнитомягких и магнито жестких ферритов [12]. Преимуществом такой нетривиальной конструкции является высокая плотность упаковки, малые потери,

хороший теплоотвод и высокая удельная мощность.

В заключении следует отметить некоторые уникальные возможности металлургических АТ, недоступные иным традиционным технологиям:

- рациональная равнопрочная облегченная конструкция детали;
- формирование каналов эффективного охлаждения (нагрева) с минимальным гидравлическим сопротивлением в теле детали или на ее поверхности;
- построение трехмерных крупногабаритных конструкций, заменяющих сборочные единицы, состоящие из десятков отдельных деталей;
- построение полиметаллических изделий, изготовленных с дискретным, либо плавным (градиентным) изменением состава, структуры и свойств материалов.

#### Литература

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
2. Порошковая металлургия – одна из первых аддитивных технологий / Ильющенко А.Ф., Савич В.В. // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: Материалы науч.-тех. конф. (Гродно, 5-6 октября 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 20–30.
3. High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints / Sajad Arabnejad, R. Burnett Johnston, Jenny Ann Pura, Baljinder Singh, Michael Tanzer, Damiano Pasini // Acta Biomaterialia 30 (2016) 345–356.
4. Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Innovation Roadmapping of Required Advancements / J.Gausemeier; N.Echterhoff, M.Wall // Heinz Nixdorf Institute,

- University of Paderborn. – Paderborn, 2013. – 106 p.
5. Аддитивные технологии в ПАО «ОАК». Департамент развития индустриальной модели. – Москва, 5 апреля 2016 года // [http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials\\_2016/3/3Boguslavskij.pdf](http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/3/3Boguslavskij.pdf).
6. Design the difference // <http://www.altair.com/design4am>.
7. Cost and practicality of in-process monitoring for metal Additive Manufacturing / Ch.Hole // Metal Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 2, No. 4. – P. 63-69.
8. DMLS Additive Metal Manufacturing / <http://burloaktech.com/additive-manufacturing/additive-metal-manufacturing>.
9. Siemens Achieves Breakthrough with 3D Printed Gas Turbine Blades // <https://www.3dprintingbusiness.directory/news/siemens-achieves-breakthrough-3d-printed-gas-turbine-blades/>.
10. Renishaw: Global Solutions Centres offer end-users an alternative route to develop new metal AM applications / R.Weston // Metal Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 2., No. 1. – P. 59-65.
11. Metal 3D printing: technology of the future for lighter and more compact engines / Press releases, 11.01.2017 // <http://corporate.renault-trucks.com/en/press-releases/2017-01-11-metal-3d-printing-technology-of-the-future-for-lighter-and-more-compact-engines.html>.
12. Изготовление полиметаллических деталей с помощью лазерных аддитивных технологий / Е. Раевский // Аддитивные технологии. – № 2. – 2017. – С.32-35.
13. Nano-Magnets and Additive Manufacturing for Electric Motors / Ajay Misra NASA Glenn Research Center // 8th Annual CAFE Electric Aircraft Symposium April 25, 26, 2014, Santa Rosa, California // <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140010481.pdf>.
14. Аддитивное производство металлических изделий (обзор) / В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов // Автоматическая сварка. – 2016. – №5–6 (753). – С. 148-153.

УДК 621.382

### ВЛИЯНИЕ ВИДА ОСНОВНОЙ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИФфуЗИИ ИТТЕРБИЯ

Бринкевич Д.И.<sup>1</sup>, Оджаяев В.Б.<sup>1</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Черный В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Получение более качественных кремниевых подложек для формирования компонентов полупроводниковой микроэлектроники возможно с помощью ионной имплантации редкоземельных элементов (РЗЭ). При легировании Si лантаноидами происходит формирование стоков для фоновых технологических примесей и

радиационных дефектов, благодаря высокой геттерирующей способности РЗЭ как в расплаве кремния, так и в твердой фазе [1, 2].

Целью работы являлось исследование влияния постимплантационной термообработки на поведение примесей редкоземельных элементов,

введенных в пластины монокристаллического кремния методом ионной имплантации.

Имплантация осуществлялась в пластины КДБ-0.3 с ориентацией (111) и КЭФ-4.5 (100) при комнатной температуре ионами  $Yb^+$  с энергиями  $E = 35-120$  кэВ дозами до  $D_{Yb} = 200$  мкКл/см<sup>2</sup>, а так же ионами  $P^+$ ,  $B^+$ ,  $Sb^+$  с энергией  $E = 35 - 60$  кэВ и дозами до  $D = 1000$  мкКл/см<sup>2</sup>. Изохронная (длительность 15 мин. с шагом 25 °С) и изотермическая термообработки (ТО) проводилась в вакууме. Профили распределения внедренных примесей определялись методами вторичной ионной масс-спектрометрии и резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Для контроля поверхностных загрязнений пластин кремния использовалась электронная Оже-спектроскопия.

Непосредственно после внедрения профили распределения атомов  $Yb$  достаточно хорошо описываются распределением Гаусса. Последующая имплантация основных легирующих примесей бора и фосфора не приводит к существенной трансформации профиля распределения лантаноида. Предварительное внедрение ионов бора  $D_B = 200$  мкКл/см<sup>2</sup> и более или сурьмы приводило к изменению приповерхностной части профиля распределения иттербия. При снижении дозы имплантации бора менее 100 мкКл/см<sup>2</sup> указанный эффект не наблюдался. По-видимому, такие изменения обусловлены имплантацией  $Yb^+$  через аморфизованный слой, созданный у поверхности предварительным внедрением  $B^+$  или  $Sb^+$ . При изменении последовательности имплантации (предварительное внедрение  $Yb^+$  с последующей имплантацией бора или фосфора) эффект изменения переднего фронта наблюдался для легирующей примеси, которая внедрялась через аморфизованный слой, созданный РЗЭ.

В процессе термообработки ионно-имплантированных слоев Si:B,Yb максимум распределения атомов иттербия сдвигается к поверхности и концентрация  $Yb$  в приповерхностном слое возрастает (рисунок 1). Миграция РЗЭ к поверхности пластины наблюдается уже после ТО при  $T = 450$  °С. Ее эффективность возрастает с повышением температуры. После отжига ( $T = 950$  °С, 15 мин.) подавляющее количество атомов лантаноида находится в приповерхностной области на глубине до 100 Å.

В пластинах КЭФ-4.5(100), имплантированных  $Yb^+$  рассматриваемый процесс протекал значительно интенсивнее, чем в КДБ-0.3(111). Это обусловлено тем, что кристаллографической ориентации (100) соответствует менее плотная атомная упаковка, чем соответствующее значение для ориентации (111).

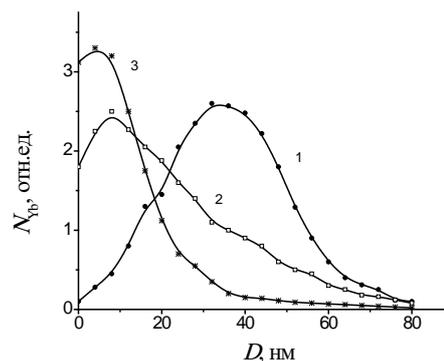


Рисунок 1 – Профили  $Yb$  ( $E = 60$  кэВ;  $D_{Yb} = 200$  мкКл/см<sup>2</sup>) после имплантации в пластины КДБ-0.3(111) (1) и отжига при  $T = 450$  °С (2) и  $950$  °С (3), 15 мин

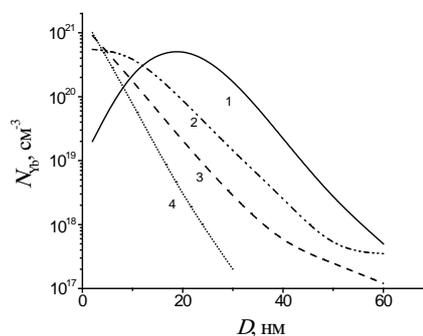


Рисунок 2 – Профили иттербия в Si:B,Yb (1–3) и Si:Yb (1, 4) после имплантации (1) и ТО при  $T = 950$  °С (2–4), 15 мин. Доза бора, мкКл/см<sup>2</sup>: 2–200; 3–20

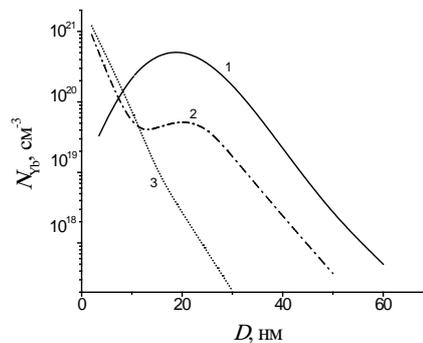


Рисунок 3 – Профили иттербия после имплантации (1) и отжига  $T = 950$  °С (2,3), 15 мин. 1, 3 – Si:Yb; 1, 2 – Si:Yb,P

Предварительная имплантация бора замедляла диффузию  $Yb$  к поверхности (рисунок 2), причем с ростом дозы имплантированного бора, указанный эффект проявлялся более отчетливо (кривые 2 и 3). Как известно [3], при имплантации бора в приповерхностной области образуется аморфизованный слой. Последующее внедрение иттербия приводит к перекрытию нарушенных областей, созданных ионами  $B^+$  и  $Yb^+$ . Таким

образом, с увеличением дозы бора степень разупорядоченности приповерхностной области снижается, и учитывая вакансионный механизм диффузии иттербия, следует ожидать замедления его миграции к поверхности.

Замедление диффузии Yb к поверхности наблюдалось также и в Si:Yb,P (рисунок 3). Однако оно носило качественно другой характер, чем в образцах Si:B. В процессе ТО  $T = 450^\circ\text{C}$  наблюдается слабое смещение профиля распределения Yb к поверхности. Повышение температуры отжига усиливает миграцию лантаноида, однако, на глубине соответствующей проецированному пробегу остается четко выраженный пик, интенсивность которого с увеличением длительности ТО снижается. При этом профиль распределения иттербия со стороны объема пластины практически не претерпевает изменений, основная часть примеси движется к поверхности. В данном случае имеет место взаимодействие атомов Yb и P с образованием комплексов, включающих в свой состав атомы обеих примесей. Данные комплексы, вероятно, не создают в кремнии значительных полей упругих напряжений и поэтому их движение в кристалле маловероятно.

При облучении быстрыми нейтронами, образующиеся вакансии и их комплексы, эффективно стимулируют процесс диффузии атомов редкоземельных примесей [1]. Вероятно, при  $T = 450^\circ\text{C}$  миграция атомов Yb к поверхности вызвана радиационно-стимулированной диффузией по вакансионному механизму. Направленность диффузии обусловлена как упругими напряжениями несоответствия, образующимися при имплантации PЗЭ, так и влиянием поверхности пластины. Миграция атомов лантаноида приводит к снятию указанных напряжений. При более высоких температурах ( $T = 600$  и  $950^\circ\text{C}$ ) вследствие малости коэффициента сегрегации примеси имеет место образование узкого сегрегационного пика

концентрации в аморфной фазе перед фронтом рекристаллизации и оттеснение ее вместе с фронтом рекристаллизации к поверхности. Известно [4, 5], что в слое  $\alpha$ -кремния вблизи фронта рекристаллизации коэффициент диффузии примеси PЗЭ Eg более чем на 3 порядка может превышать аналогичное значение для монокристалла. Зависимость эффективности движения иттербия к поверхности от величины дозы внедренного бора отражает тот факт, что кроме миграции под действием упругих сил и смещения вместе с фронтом рекристаллизации, при  $T=950^\circ\text{C}$  имеет место и вакансионный механизм диффузии лантаноида. При дополнительном внедрении фосфора миграция PЗЭ к поверхности менее заметна вследствие формирования комплексов, включающих в свой состав атомы P и Yb.

Установлено, что в процессе высокотемпературной ТО наблюдается движение внедренной примеси PЗЭ к поверхности, причем в случае дополнительной имплантации бора данная миграция существенна уже при  $T = 450^\circ\text{C}$ , когда рекристаллизации еще не происходит. При  $T > 600^\circ\text{C}$  характер миграции к поверхности примесей PЗЭ в значительной степени зависит от условий дополнительного внедрения основных легирующих примесей. При дополнительном внедрении бора эффективность движения замедляется с увеличением дозы.

#### Литература

1. Гусаков В.Е и др. // Электронная техника. Сер.6. Материалы. – 1989. – №.4 – С.29-32.
2. Петров В.В. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1993. – № 1. – С.86-88.
3. Odzhaev V.B. et al // J.Applied Physics A. – 1996. – V. A62. – P. 355-358.
4. Custer J.S. et al // Journal of Applied Physics. – 1994. – V.75, № 6. – P.2809- 2817.
5. Polman A. et al // Journal of Applied Physics. – 1997. – V.81, № 1. – P.150-153.

УДК 621.32+53.087.351+535.21:(667.635+667.637)

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КРАСОК

Рыжевич А.А.<sup>1</sup>, Митьковец А.И.<sup>1</sup>, Смирнов А.Г.<sup>1</sup>, Машенко А.Г.<sup>1</sup>, Железнякова Т.А.<sup>1,2</sup>,  
Гореленко А.Я.<sup>3</sup>, Захарич М.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Республиканское научно-техническое унитарное предприятие «КРИПТОТЕХ» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Для проведения экспериментальных исследований в рамках научно-исследовательской работы «Фотонная сушка токопроводящих красок. Шифр «ФСТК» по договору № 531 «ФСТК» от 20 апреля 2016 г. были скомплектована и смонтированы две экспериментальные установки. Первая установка для исследования процессов

ФСТК была создана на основе мощной импульсной ксеноновой лампы (рисунок 1) и собрана по модульному принципу на колесном шасси 1. На верхней огражденной полке закреплен блок питания 2 типа БПЛ 66/33У или БПЛ 75/33У. Ниже внутри каркаса шасси установлена подвижная рама 3, к которой регулировочными

шпильками прикреплен излучатель 4, содержащий ксеноновую лампу. Под излучателем на выносных кронштейнах установлен электромеханический позиционер (ЭМП), содержащий блок питания и управления 5.1, оптический рельс 5.2, универсальную каретку 5.3 и реверсивный двигатель 5.4. На нижней полке установлен двухконтурный блок охлаждения 6 типа вода-вода, осуществляющий прокачку дистиллированной воды через излучатель 4 с ксеноновой лампой.

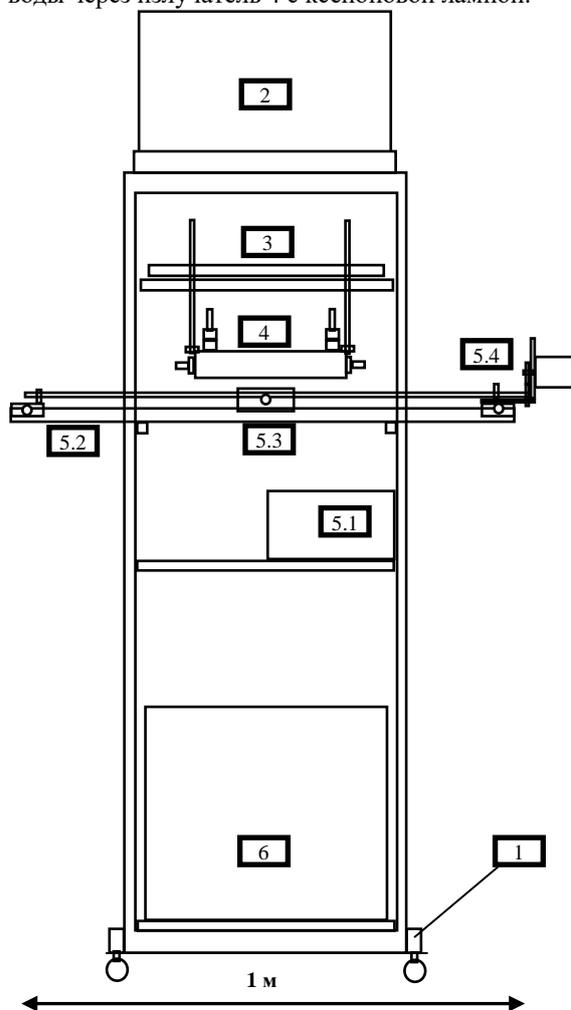


Рисунок 1 – Компоновка экспериментальной установки (пронумерованные позиции названы и/или описаны в тексте)

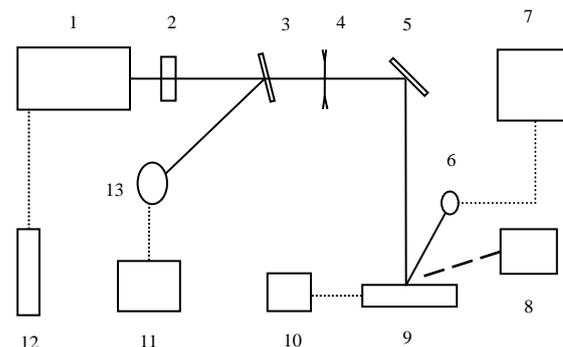
С целью увеличения КПД излучателя для него был изготовлен светоотражающий кожух, состоящий из двух слоев листового металла (верхний, корпусный, из нержавеющей стали, а нижний – отражающий, из шлифованного алюминиевого сплава). Благодаря наличию отражающего кожуха выход излучения в направлении образца увеличивается более чем в 2 раза. Параллельно кожух выполняет также и защитные функции (защита органов зрения от мощного светового излучения, защита от разлета осколков при возможном взрыве лампы с разрушением трубки из кварцевого стекла,

защита трубки от оседания пыли и возможных механических повреждений).

Созданная экспериментальная установка генерирует импульсы электромагнитного излучения с энергией 75 Дж и с частотой следования, дискретно задаваемой блоком питания: 1, 3, 5, 10, 25, 50 Гц. Скорость перемещения каретки ЭМП зависит от коэффициента редукции используемого двигателя. Оптимальным при полученных энергетических характеристиках излучателя был признан двигатель, обеспечивающий скорость перемещения каретки 12 см/мин.

Под действием оптического излучения импульсной ксеноновой лампы происходили процессы нагрева и сушки токопроводящей краски на образцах, перемещаемых под излучателем с помощью ЭМП.

Вторая экспериментальная установка для исследования процесса лазерного спекания токопроводящих красок (ТК) собрана на основе частотного твердотельного лазера, генерирующего на длинах волн 1,06 мкм и 0,532 мкм, а также непрерывно перестраиваемого посредством сапфир-титановой приставки в двух спектральных диапазонах 350 – 500 нм и 700 – 1000 нм.



1 – лазерный излучатель; 2 – держатель фильтров; 3 – светоделитель; 4 – рассеивающая линза; 5 – поворотное зеркало; 6 – фотодиод; 7 – осциллограф; 8 – устройство отвода продуктов сушки и абляции; 9 – подвижной столик системы позиционирования; 10 – блок питания; 11 – измеритель энергии; 12 – пульт управления; 13 – пирозлектрический приемник.

Рисунок 2 – Схема установки

Схема второй собранной установки представлена на рис. 2. Исследуемые образцы размещаются на подвижном столике системы позиционирования 9, снабженном реверсивным электродвигателем, частота вращения которого регулируется напряжением, подаваемым на его обмотки стабилизированным источником питания 10. Система позиционирования позволяет поступательно перемещать образец с постоянной скоростью в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного пучка, с возможностью регулировки скорости

перемещения. С помощью светоделительной пластинки 3 часть излучения генерации лазера отводится на пироэлектрический приемник измерителя энергии фирмы Orhir 11 для контроля плотности мощности излучения падающего на образец. Рассеивающая линза 4 опционально используется для изменения плотности мощности облучения. С помощью фотоприемника ФП 150А 6 и осциллографа Tektronix TDS 3052В 7 осуществляется контроль длительности вспышки при воздействии излучения на образец. Устройство 8 служит для удаления продуктов, образующихся при сушке, спекании или абляции с поверхности исследуемого образца.

Лазер 1 состоит из двух частей: собственно АИГ:Nd<sup>3+</sup> лазера и встроенного в его блок излучателя перестраиваемого по длине волны преобразователя на кристаллах TiSa. Работа лазера основана на получении стимулированного излучения в активном элементе (АЭ) из кристалла АИГ:Nd<sup>3+</sup> при накачке излучением импульсной ксеноновой лампы. Для получения "гигантского" импульса наносекундной длительности производится модуляция добротности лазерного резонатора электрооптическим затвором  $\lambda/4$  из кристалла KDP. Преобразование излучения основной частоты (ОЧ) в излучение второй гармоники (ВГ) осуществляется в кристалле КТР. Оптическая накачка АЭ осуществляется импульсной лампой NL 7054. Работа преобразователя основана на получении стимулированного излучения в АЭ из кристалла TiSa при накачке излучением ВГ АИГ:Nd<sup>3+</sup> лазера с модулированной добротностью. Перестройка длины волны генерации основного излучения TiSa лазера в области 350 – 500 нм во вторую гармонику осуществляется с помощью кристалла ВВО. Селекция излучения ОЧ и ВГ производится

спектроразделительными зеркалами. Основные характеристики лазерных пучков различных длин волн, формируемых установкой и использовавшихся для лазерной обработки образцов ТК, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики лазерного излучения различных длин волн

Длина волны, нм	Макс. энергия накачки, Дж	Макс. энергия импульса лазерного излучения, мДж	Характерные размеры светового пятна, мм
1064 без модул. добр.	19	200	6
1064 с модул. добр.	16	160-180	5,5
532	16	128,5	5,5
532	15	107,2	5,4
532	12	46,5	4,0
355	16	5,5	1,5
410	16	15,6	2×3 (эллипс)

Лазерная обработка образцов ТК производилась с частотой 5 Гц при скорости перемещения образца 30 мм/мин. После обработки при оптимальных режимах минимальное электрическое сопротивление дорожек ТК шириной  $2,0 \pm 0,1$  мм, длиной  $3,0 \pm 0,1$  мм и толщиной до 20 мкм составляло 0,2 Ом, что всего лишь в несколько раз превышает сопротивление аналогичных полос цельной технической меди.

УДК 669.(6-8):539.2

## СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВОВ (Sn<sub>4</sub>In)<sub>100-x</sub>Bi<sub>x</sub>, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Шепелевич В.Г.<sup>1</sup>, Гусакова С.В.<sup>1</sup>, Гусакова О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ  
Минск, Республика Беларусь

Эвтектический сплав In - 47 ат.% Sn, а также сплавы, близкие к нему по составу, используются в качестве легкоплавких припоев. Эвтектика состоит из  $\beta$ -фазы (In<sub>3</sub>Sn) и  $\gamma$ -фазы (InSn<sub>4</sub>). При этом влияние легирующих элементов на структуру и физические свойства  $\gamma$ -фазы изучены крайне недостаточно. В последнее время активизировались исследования по изучению диаграмм состояния систем Sn – In – X (X = Bi, Zn и др.) [1]. Однако высокоскоростное затвердевание из жидкости, относящееся к энерго- и ресурсосберегающим технологиям [2], может

приводить к образованию метастабильных фаз, не соответствующих равновесным. В связи с этим имеет важное научное и практическое значение исследование структуры и свойств быстрозатвердевших сплавов олово-индий, легированных третьим компонентом. Целью данного исследования является изучение влияния висмута на структуру и физические свойства сплава Sn – 11 ат. % In.

Сплавы (Sn – 11 ат. % In) – x ат. % Bi (в дальнейшем (Sn<sub>4</sub>In)Bi<sub>x</sub>, x = 0; 2, 4 и 8) получены сплавлением компонентов в кварцевой ампуле и

последующей кристаллизацией. Затем кусочек сплава массой до 0,2 г расплавляли и инжигировали на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра. Расплав растекался по поверхности цилиндра и затвердевал в виде фольги толщиной 30–100 мкм. Расчетная средняя скорость охлаждения не менее  $10^5$  К/с [3].

Микрофотографии получались на РЭМ в отраженных электронах Рентгеноспектральный микроанализ обеспечивал контроль состава фольги и распределение компонент. Исследование зеренной структуры осуществлялась методом дифракции отраженных электронов, который выполнялся с помощью дифракционной приставки фазового анализа HKL EBSD Premium System Channel 5 к РЭМ. Рентгеноструктурный анализ использовался для определения их фазового состава. Измерение микротвердости  $H_u$  фольг проводилось на приборе ПМТ-3 с использованием нагрузки 2 г и погрешностью 5 %.

Рентгенограмма быстрозатвердевшей фольги Sn – 11 ат. % In содержит только дифракционные линии  $\gamma$ -фазы ( $\text{Sn}_4\text{In}$ ) Легирование  $\gamma$ -фазы Bi вызывает появление на рентгенограмме дополнительных дифракционных отражений, соответствующих олову.

Изображения поперечного сечения фольги сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$ , полученные после ее изготовления и выдержки в течение 30 и 150 ч при температуре 20°C, представлены на рисунке 1. В сечении фольги сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$  наблюдаются четко выраженные белые выделения (рисунок 1а и 1б).

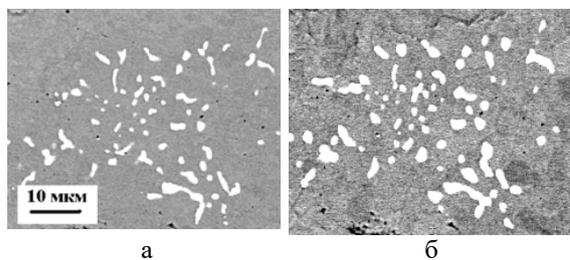


Рисунок 1 – Микроструктура поперечного сечения фольги сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$  после выдержки при  $T_{\text{ком}}$  в течение 30 ч (а) и 150 ч (б)

С помощью рентгеноспектрального микроанализа определен химический состав белых выделений в сплаве  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$ . Отношение концентраций индия и висмута составляет 0, 96, что соответствует  $\epsilon$ -фазе ( $\text{BiIn}$ ). В фольгах сплавов  $(\text{SnIn})\text{Bi}_x$ , содержащих 2 и 4 ат. % Bi, выделения  $\epsilon$ -фазы не наблюдались.

Параметры микроструктуры фольг сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$  представлены в таблице 1.

Выдержка фольги сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$  при комнатной температуре в течение 150 ч вызывает увеличение объемной доли и средней величины хорд выделений  $\epsilon$ -фазы, межфазной границы и плотности частиц. Таким образом, при комнатной

температуре происходит распад пересыщенного твердого раствора, приводящий к появлению новых и росту существующих частиц  $\epsilon$ -фазы.

Таблица 1 – Параметры микроструктуры фольги сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$

Параметры микроструктуры	Выдержка 30 ч	Выдержка 150 ч
Объемная доля $\epsilon$ -фазы, %	2,1	3,5
Средняя величина хорд, мкм	1,5	1,7
Удельная поверхность, $\text{мкм}^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$
Число сечений частиц $\epsilon$ -фазы на единицу площади, $\text{мкм}^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$

При высокоскоростном затвердевании из-за значительного переохлаждения расплава происходит увеличение скорости образования центров кристаллизации, что способствует формированию микрокристаллической структуры. На рисунке 2 представлено изображение зеренной структуры слоев, прилегающих к поверхностям А и В, фольги сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_4$ . Зерна на поверхности А имеют вытянутую форму, а на поверхности В равноосную. Объемные доли олова и  $\gamma$ -фазы, составляют 0,3 и 0,7 соответственно

Различная концентрация висмута и выдержка быстрозатвердевших сплавов  $(\text{SnIn})\text{Bi}_x$  при комнатной температуре приводят к изменению их физических свойств. Микротвердость быстрозатвердевших фольг меньше микротвердости массивных образцов, полученных при скоростях охлаждения  $10^2$  К/с. На рисунке 3 представлены зависимости микротвердости быстрозатвердевших сплавов  $(\text{SnIn})\text{Bi}_x$  с различной концентрацией висмута от времени выдержки при комнатной температуре. Микротвердость бинарного сплава и сплавов с концентрацией 2 и 4 ат. % Bi монотонно увеличивается в процессе выдержки при комнатной температуре, а сплава с концентрацией 8 ат. % Bi не изменяется.

В исследуемых стареющих легкоплавких сплавах изменение микротвердости может быть обусловлено процессами распада пересыщенных твердых растворов также изменением состояния границ зерен. В исходных фольгах границы зерен являются разупрочненными зонами. При комнатной температуре кроме выделения дисперсных частиц активно протекают диффузионные процессы, способствующие улучшению структуры границ зерен и фаз. Это приводит к повышению прочностных свойств при комнатной температуре.

Таким образом, тройные сплавы  $(\text{SnIn})\text{Bi}_x$ , содержащие 2 и 4 ат. % Bi, полученные высокоскоростным охлаждением из жидкой фазы,

состоят из твердых растворов Bi в  $\gamma$ -фазе и олове, а тройной сплав  $(\text{SnIn})\text{Bi}_{0,08}$  – из твердых растворов Bi в  $\gamma$ -фазе и олове, а также и  $\epsilon$ -фазы. Исходные фольги сплавов  $(\text{SnIn})\text{Bi}_x$  по сравнению с массивными образцами характеризуются низкой микротвердостью.

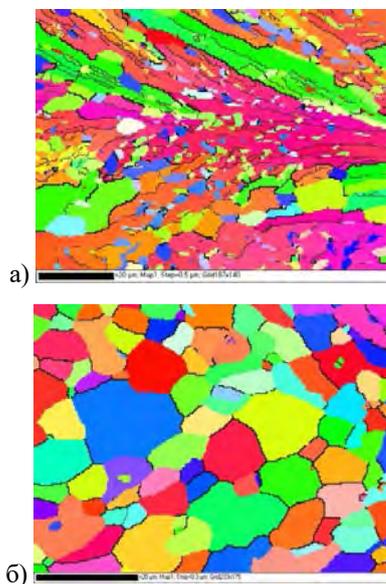


Рисунок 2 – Зеренная структура фольг сплава  $(\text{SnIn})\text{Bi}_8$ : а-сторона, прилегающая к кристаллизатору, б- свободно затвердевающая сторона

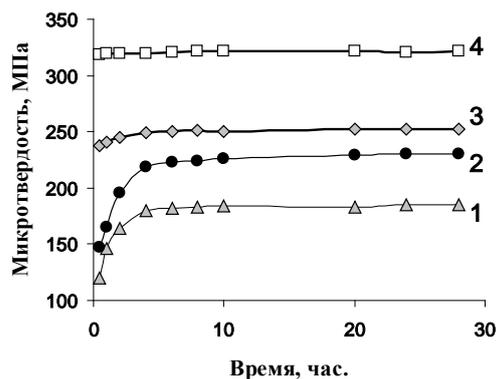


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости фольг сплавов  $(\text{SnIn})\text{Bi}_x$  от времени выдержки при комнатной температуре и от содержания висмута: 1- $X=0$ ; 2-  $X=2$ ; 3-  $X=4$ ; 4-  $X=8$  ат.%

#### Литература

1. R. M. Shalaby. Effect of silver and indium addition on mechanical properties and indentation creep behavior of rapidly solidified Bi – Sn based lead-free solder alloys / Materials Science & Engineering. A. 2013. 560. P.86-95.
2. Васильев В.А. Высокоскоростное затвердевание расплавов (теория, технология и материалы). Под общей ред. Б.С. Митина. – М.: «СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ», 1998. – 400 с.
3. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.

УДК 616-77, 681.2

## ПОКРЫТИЯ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИТИНОЛА

Савченко А.Л.<sup>1</sup>, Латушкина С.Д.<sup>2</sup>, Минченя В.Т.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время в Республике Беларусь имеется и все возрастает потребность в расходных материалах для сосудистой хирургии. Это связано с ростом сердечно-сосудистых патологий и появлением новых методик их лечения. Такие методики связаны с использованием специальных эндопротезов и других изделий, выполненных из нитинола – стентов, стентграфтов, клапан-содержащих стентов, фильтров-ловушек и др. Все эти изделия представляют достаточно сложные по форме пространственные структуры, получаемые гибкой из нитиноловой проволоки с использованием дополнительных операций сварки, соединения пластическим деформированием с помощью трубок. На настоящий момент такие изделия в Республике Беларусь практически не производятся, а иностранные образцы имеют крайне высокую стоимость, что делает операции с их использованием недоступным широким массам

пациентов. Разработка технологии формообразования нитиноловых структур позволит внедрить их в производстве импортозамещающих аналогов медицинских изделий.

Внутрисосудистые эндопротезы работают в биологически активной среде, которой является кровь и другие биологические жидкости, и, следовательно, подвергаются ускоренной коррозии. Срок службы изделий внутри организма составляет не менее 20 лет. Несмотря на то, что по своей биологической инертности никелид титана превосходит все известные коррозионностойкие стали и сплавы, с учетом высоких требований надежности следует предусматривать дополнительную антикоррозионную защиту, так как выход ионов никеля из сплавов на основе NiTi – самая большая проблема, которая стоит при медицинском внедрении нитинола [1]. При этом необходимо обеспечить и высокую эластичность покрытия,

так как изделие в процессе работы подвержено циклическим деформациям.

Для защиты изделий от коррозии используют либо гальванические покрытия, либо модификацию поверхностных слоев материала.

Примером гальванического покрытия может служить метод [2].

Изделие покрывают в растворе электролита специального состава с особыми электрическими режимами, что обеспечивает высокую прочность, эластичность и биологическую инертность. В методе [3] для аналогичных целей электролитическим методом наносится слой нитрида титана. Достоинство – малая толщина слоя. Аналогичный эффект достигается модифицированием поверхности нитинола ионами кремния в вакууме. При высокой коррозионной стойкости этот вариант имеет значительно большую прочность поверхностных слоев при циклических нагрузках.

В качестве основного способа нанесения покрытий из нитрида титана выбран способ осаждения из сепарированных многокомпонентных потоков с использованием вакуумно-дуговой модернизированной установки, оснащенной сепаратором макрочастиц [4].

Способ характеризуется рядом преимуществ, среди которых можно выделить основные:

- осаждение покрытий высокой плотности, низкой шероховатости и однородной структуры при обеспечении прочной адгезии в системе;
- непрерывное легирование конденсируемого покрытия по всему объему, что позволяет обеспечивать его уникальные физико-механические свойства за счет различных механизмов управления структурой;
- формирование наноструктурированных композиционных покрытий и обеспечение сохранения нанометрических размеров зерен за счет контроля температуры конденсации покрытий.

Для получения покрытий распрыскиваются катоды из титана и алюминия, или циркония, или меди в среде азота. Управление фазовым составом покрытий обеспечивается изменением тока дугового разряда на дополнительном катоде (алюминиевом, циркониевом, медном).

Для оценки возможности нанесения многокомпонентных покрытий на никелид титана были взяты образцы проволоки диаметром 0,2 мм, используемой для изготовления каркасов стент-графтов. На проволоку были нанесены покрытия из нитрида титана с использованием описанной выше методики. Анализ качества нанесенного покрытия выполнялся с использованием электронного микроскопа.

На рисунке 1 показаны фотографии поверхности исходного нитинола без покрытия

(а) и образца с покрытием TiN, нанесенным с различными режимами работы установки (б).

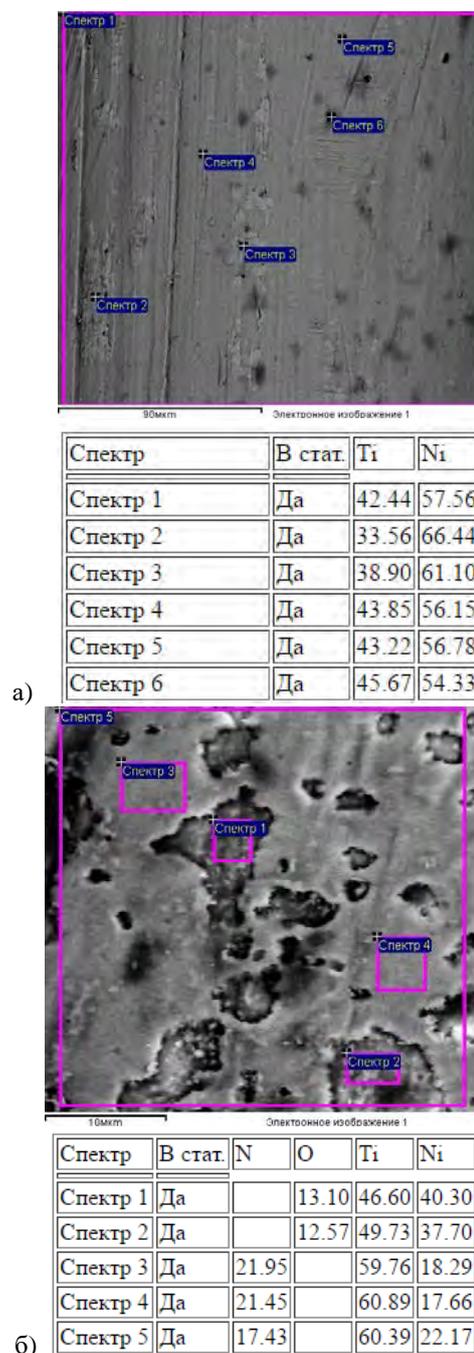


Рисунок 1 – Микрофотографии поверхности исходного нитинола (а) и с покрытием (б)

По результатам анализа можно сделать следующие выводы.

1. Исходная поверхность нитиноловой проволоки имеет множество дефектов виде пор и рисок. Распределение химического состава по поверхности практически равномерное.
2. На поверхности покрытия можно выделить участки, на которых покрытие отсутствует (1 и 2 на рисунке 1, б) и участки с повышенным

содержанием титана, преимущественно в местах дефектов исходной поверхности.

Исходя из вышесказанного, направлением дальнейших исследований будет совершенствование режимов нанесения покрытий с целью исключения непокрытых участков, а также выбор метода подготовки исходной поверхности для уменьшения влияния дефектов на качество покрытия.

#### Литература

1. Муслев С.А., Шумилина О.А. Медицинский нитинол: друг или враг? Ещё раз о биосовместимости никелида титана // *Фундаментальные исследования*. – 2007. – № 10. – С. 87-89.

2. Гнеденков С.В., Хрисанфова О.А., Синебрюхов С.Л., Пузь А. В. Способ получения защитных покрытий на изделиях из нитинола. Пат. 2319797 РФ, МПК С25D 1/26; заявитель Институт химии ДВО РАН – № 2006129478/02; заявл. 14.06.2006; опубл. 20.03.2008 // *Бюл.* №8.

3. Способ модифицирования поверхности титана и его сплавов. Пат. 2496924 РФ, МПК С25D 9/06, С25D 11/26; заявители Попова О.В., Марьева Е.А., Клиндухов В.Г., Сербиновский М.Ю. – № 2012126723/02; заявл. 26.06.2012; опубл. 27.10.2013 // *Бюл.* №30.

4. Вакуумно-дуговые нанокристаллические покрытия на основе нитрида титана / Латушкина С.Д. [и др.]. – *Перспективные материалы*. – 2014. – № 6. – С. 49–55.

УДК 539.2.669.(6-8)

### СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА Sn–14 ат. % In–6,5 ат. % Zn

Шепелевич В.Г., Метто Е.С., Гусакова С.В., Гусакова О.В.

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

Решение Европейского союза и ряда других стран о защите поставки и продажи бытовой электроники, в которых использованы свинцовосодержащие припои, вызвала потребность в разработке материалов для бессвинцовой пайки. В настоящее время эту проблему решают использованием припоев на основе эвтектических сплавов (Sn–Bi, Sn–Ag, Sn–Ag–Cu и др.), а также сплавов, близких по составу к эвтектическим. К числу легкоплавких сплавов, используемых в качестве припоя, относится сплав Sn–8,8 мас. % Zn. Однако он склонен к окислению из-за высокой концентрации цинка. В данной работе рассматривается сплав, содержащий не только цинк, но и индий при определенной концентрации, благодаря которого основной фазой является не  $\beta$ -олово, а  $\gamma$ -фаза (Sn<sub>4</sub>In). [1] Из-за высокой стоимости индия целесообразно для получения припоя использовать ресурсо- и энергосберегающие технологии, к которым относится высокоскоростные затвердевания [2-4]. Но при сверхвысоких скоростях охлаждения (более  $10^5$  К/с) при затвердевании формируется структура, которую невозможно получить обычными технологиями. В связи с этим актуальным является исследование структуры и физических свойств фольг сплава Sn–14 ат. % In–6,5 ат. % Zn, полученными высокоскоростным затвердеванием.

Сплав Sn–14 ат. % In–6,5 ат. % Zn (в дальнейшем Sn–14In–6,5Zn) сплавлен из компонентов в кварцевой ампуле. Кусочек сплава массой 0.1...0.2 г расплавляли, а затем инжектировали на внутреннюю полированную

поверхность быстровращающегося медного цилиндра диаметром 20 см, Капля растекалась по поверхности кристаллизатора и затвердевала в виде фольги длиной до 15 см, шириной до 10 мм. Для исследования использовались фольги толщиной 40–80 мкм. Скорость охлаждения расплава, достигаемая при сверхбыстрой закалке из жидкого состояния, как показал расчет [3], не ниже  $10^5$  К/с.

Исследование микроструктуры фольг осуществлялось методом растровой электронной микроскопии на микроскопе LEO1455 VP. Фазовый состав и текстура фольг определялся методом рентгеновской микроскопии с использованием дифрактометра ДРОН-3. Текстура фольг изучалась с помощью обратным полюсных фигур. Полюсная плотность дифракционных линий рассчитывалась по методу Харриса [5]. Микротвердость  $H_{\mu}$  фольг измерена на приборе ПМТ-3 г. Погрешность измерения  $H_{\mu}$  равна 4%. Испытания на растяжение проводились с помощью разрывной машины Testometric M350-10ST при комнатной температуре.

Поверхность фольг *A* в сплаве Sn–14In–6,5Zn, прилегающая к кристаллизатору, имеет блестящий вид. На ней наблюдались раковины микронных размеров. Противоположная сторона фольги *B* имеет выступы и впадины.

На дифрактограмме фольги сплава наблюдаются дифракционные отражения  $\gamma$ -фазы, имеющей простую гексагональную кристаллическую решетку, 0001,  $10\bar{1}0$ ,  $10\bar{1}1$ , 0002 и др. Кроме того, обнаружены слабые

дифракционные отражения цинка  $0002$ ,  $10\bar{1}0$ ,  $10\bar{1}2$ ,  $11\bar{2}2$  и др.

Изображение микроструктуры фольги сплава через 5, 25 и 50 ч выдержки при комнатной температуре после изготовления представлены на рисунке 1. Серый цвет соответствует гамма  $\gamma$ -фазе, а дисперсные черные выделения – цинку. Средний размер частиц и их количество на поверхности фольги увеличиваются со временем выдержки. Их появление и рост вызван распадом пересыщенного твердого раствора цинка в  $\gamma$ -фазе.

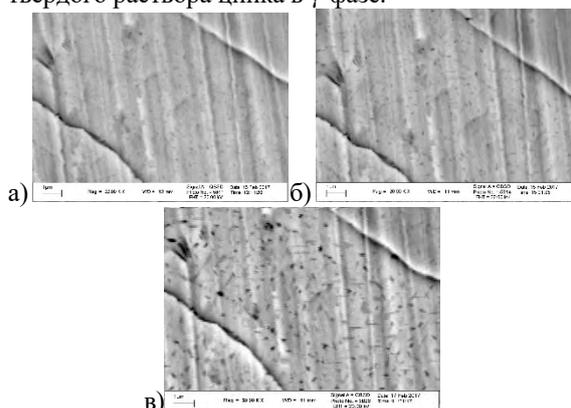


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности фольги сплава Sn–14In–6,5Zn, после 5 (а), 25 (б), 50 ч (в) при комнатной температуре

Фольга длиной 9 см разрезана на 8 равных кусков (длиной 1 см) и исследована их текстура. Дифракционные линии  $0002$  и  $10\bar{1}1$ , имеют наибольшие значения полюсных плотностей, т.е. в фольге образуется двойная текстура и  $(0001)+(10\bar{1}1)$ . Зависимости полюсных плотностей дифракционных линий от расстояния вдоль фольги представлены на рисунке 2. Текстура  $(10\bar{1}1)$  преобладает только в начале фольги, а в остальных частях фольги преобладают компоненты текстуры  $(0001)$ . При этом текстура  $0001$  наиболее сильно проявляется в центральной ее части.

Зависимость микротвердости фольги сплава вдоль ее длины приведена на рисунке 3. Зависимость  $H_u$  характеризуется максимумом, ее максимальное значение 110 МПа достигается в средней части фольги.

Кривая растяжения фольги сплава представлена на рисунке 4. Предел прочности фольги  $\sigma_B=31$  МПа, а относительное удлинение  $\delta=13$  %, то есть сплав является достаточно пластичным.

Таким образом, фольга сплава Sn–14In–6,5Zn, полученная высокоскоростным затвердеванием из расплава, состоит из  $\gamma$ -фазы ( $Sn_4In$ ) и дисперсных частиц цинка, распределенных однородно в  $\gamma$ -фазе. В фольге образуется двойная текстура  $(0001)+(10\bar{1}1)$   $\gamma$ -фаза. Определены механические свойства быстрозатвердевших фольг:  $H_u = 110$  МПа,  $\delta = 13$  %,  $\sigma_B = 31$  МПа. Фольги могут

быть использованы в качестве легкоплавких припоев.

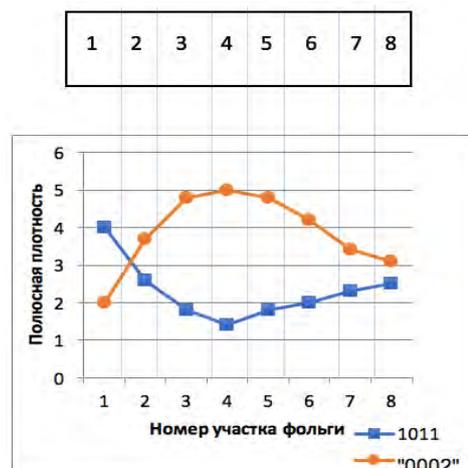


Рисунок 2 – Схема расположения участков фольги (а) и зависимость полюсной плотности дифракционных линий  $0002$  и  $10\bar{1}1$  от расстояния вдоль фольги (б)

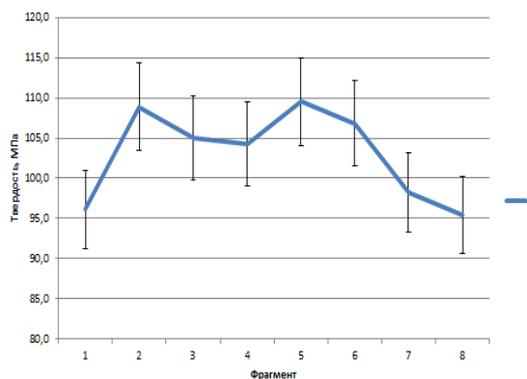


Рисунок 3. Зависимость  $H_u$  от расстояния вдоль фольги сплава Sn–14In–6,5Zn.

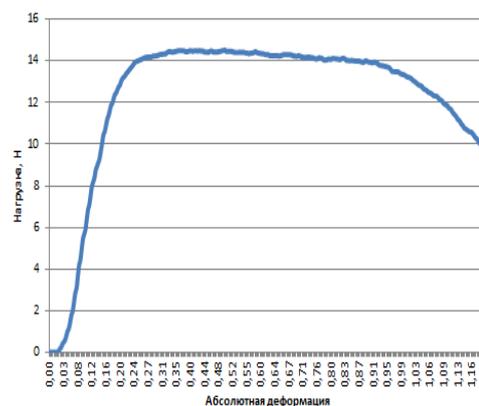


Рисунок 4. Кривая растяжения фольги сплава Sn–14In – 6,5Zn

#### Литература

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – Т.3, Кн.1. – 872 с.

2. Васильев В. А., Митин Б. С., Пашков И.Н., Серов Н.М., Скуридин А.А., Лукин А.А., Яковлев В.Б. Высокоскоростное затвердевание расплавов (теория, технология и материалы) / под ред. В.С. Митина. – М.: СП «Интермет инжиниринг», 1998. – 400 с.

3. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.  
4. Шепелевич В. Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы. – Минск: БГУ, 2015. – 192 с.  
5. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.

УДК 669.65.538.911.539.25-26

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ИНДИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ Sn-Zn-Bi-In

Гусакова О.В.<sup>1</sup>, Шепелевич В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Разработка материалов для бессвинцовой пайки стала актуальной с 2006 года, после вступления в силу запрета использования свинца и его сплавов, в том числе в электронной промышленности [1]. К настоящему времени разработаны и предлагаются на рынке ряд припоев на основе сплавов олова с серебром, медью, висмутом и др. Однако работы в этом направлении продолжаются, поскольку современные технологии изготовления материалов, такие как метод сверхбыстрого охлаждения расплава позволяют улучшить свойства известных припоев и разработать новые [2]. Поэтому настоящая работа посвящена получению, исследованию микроструктуры и механических свойств быстрозатвердевших фольг сплава Sn-Zn-Bi-In.

Для изготовления фольг использовались сплавы Sn– 8 мас.%Zn – 3 мас.% Bi–X мас.% In (X= 1,5; 2,5; 4,5; 9,0). Фольги формировались при кристаллизации тонкого слоя расплава, полученного в результате его растекания по поверхности вращающегося медного цилиндра – кристаллизатора.

Микроструктура и распределение компонент исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP оснащенного рентгеновским микроанализатором AztecEnergyAdvancedX-Max 80. Фазовый состав фольг определялся с использованием рентгеновского дифрактометра RigacuUltima 4. Микротвердость измерялась на 402MVD при нагрузке 10 г. Испытания на разрыв проводились на установке TestometricM350-10CT при скорости растяжения 5 мм/мин.

Фазовый состав фольг зависит от концентрации индия в сплаве. При содержании индия до 4,5 мас.% фольги затвердевают с образованием пересыщенного твердого раствора на основе  $\beta$ -Sn. Поскольку при комнатной температуре равновесное содержание цинка в олове не превышает 0,25 мас.%, то пересыщенный твердый раствор распадается по непрерывному механизму

с выделением дисперсных включений цинка на высокоугловых и малоугловых границах зерен, а также в объеме зерна (рисунок 1а). Висмут и индий не образуют включений и равномерно распределены в фольге (рисунок 1 б).

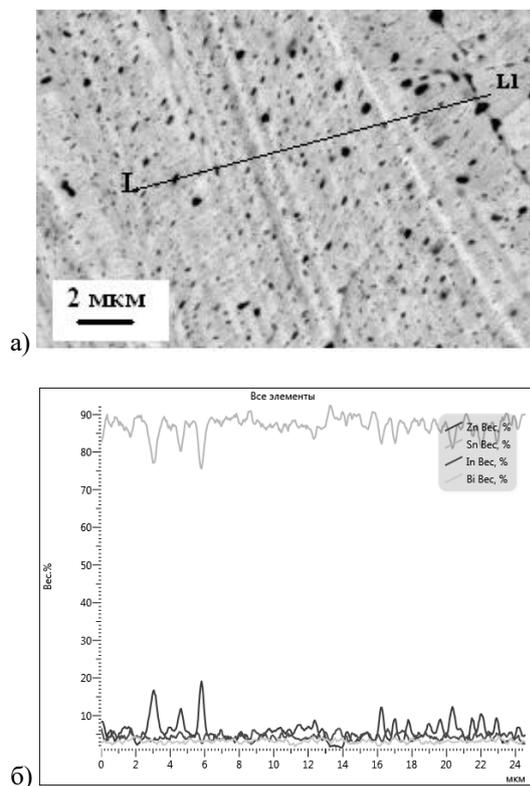
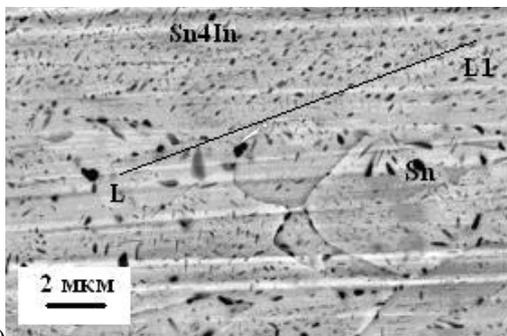


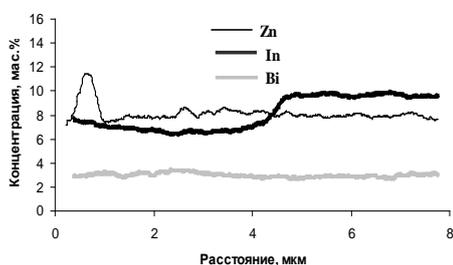
Рисунок 1 – Микроструктура (а) и распределение компонент вдоль линии сканирования L-L1 фольг сплава: а- Sn – 8 мас.% Zn – 3 мас.% Bi – 4,5 мас.% In

В фольгах, содержащих 9 мас.% In формируются две фазы: пересыщенные твердые растворы на основе олова и на основе  $\gamma$ -фазы ( $\text{InSn}_4$ ), имеющей простую гексагональную решетку. В зернах  $\beta$ -Sn концентрация In составляет

около 7 мас. %, что приводит к прерывистому механизму распада пересыщенного твердого раствора, и формированию крупных пластинчатых включений цинка (рисунок 2а). В зернах  $\gamma$ -фазы наблюдаются дисперсные равноосные включения, а также пластинчатые включения цинка с толщиной пластинок порядка 50-100 нм.



а)



б)

Рисунок 2 – Микроструктура (а) и распределение компонент вдоль линии сканирования L-L1 фольг сплава: а- Sn – 8 мас.% Zn – 3 мас.% Bi – 9,0 мас.% In

Легирование эвтектического сплава Sn-Zn-Bi индием приводит к уменьшению микротвердости (рисунок 3). При содержании In 4,5 мас % микротвердость стабилизированных фольг уменьшается на 10-15 %, что может быть связано с изменением размеров зерен. Фольги с концентрацией индия 9 мас. % имеют микротвердость практически вдвое меньшую, чем сплав без индия, что обусловлено образованием  $\gamma$ -фазы, микротвердость которой не превышает 145 МПа [3]. В исследованных стареющих сплава наиболее интенсивно микротвердость изменяется за первые несколько часов после изготовления (рис. 3). Изменение микротвердости на 10-15 %

обусловлено увеличением размеров дисперсных частиц цинка и стабилизацией границ зерен и фаз.

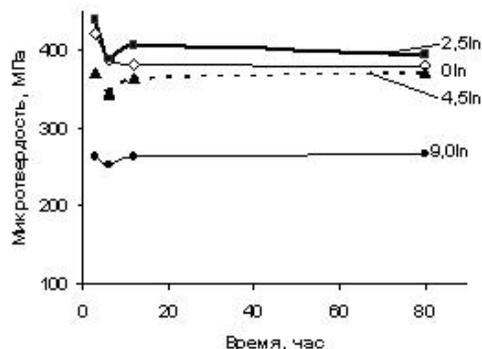


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости фольг сплавов Sn – 8 мас.% Zn – 3 мас.% Bi – X мас.% In (X=0; 2,5; 4,5; 9,0 мас.%) от концентрации In и времени старения

Результаты испытаний фольг на разрыв приведенные в таблице, показывают, что небольшие добавки индия повышают пластичность, однако при этом несколько уменьшается предел прочности.

Концентрация индия, мас. %	0	2,5	4,5	9,0
Относительное удлинение, %	3,5	5,0	5,00	18
Предел прочности, МПа	140	122	114	70

Таким образом, оптимальные механические свойства достигаются при легировании индием эвтектического сплава Sn-Zn-Bi индием не более чем на 2-3 массовых процента.

#### Литература

1. Пивненко В. Актуальность перехода к сплавам, используемым в бессвинцовых процессах // Радиоконпоненты. 2006. – № 3. – С.8-35.
2. Ланин В., Лаппо А. Повышение качества паяных соединений бессвинцовыми припоями // Технологии электронной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 38-41.
3. Ван Цзинзу, Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие фольги индия. – Минск: РИВШ, 2011. – 172 с.

УДК 539.2

### НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПЕНОПЛАСТА МАРКИ «АКРИМИД»

Адашкевич С.В.<sup>2</sup>, Бакаев А.Г.<sup>1</sup>, Маркевич М.И.<sup>1</sup>, Стельмах В.Ф.<sup>2</sup>, Чапланов А.М.<sup>1</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Новый термостойкий пенопласт марки «Акримид» получается технологией вспенивания на основе поли(мет)акриламида. Он

предназначен для использования в качестве вспененного наполнителя прежде всего в сфере авиастроения, вагоностроения, судостроения,

приборостроения и транспортного машиностроения [1, 2].

Данный материал хорошо зарекомендовал себя при использовании в качестве наполнителя лопастей, перегородок, изоляции корпусов, укрытий и других аналогичных изделий [1–3]. Уникальность нового полимера заключается в высокой температурной стойкости, он способен выдерживать тепловую нагрузку до 220 °С, что делает его конкурентоспособным относительно вспененного полиуретана, полистирола, поливинилхлорида, полистирол - акрилонитрила и др.

Плотность материала составляет до 140 кг/м<sup>3</sup>, благодаря высоким температурно-прочностным параметрам упрощается технологический процесс изготовления сэндвич-конструкций [3, 4].

В числе ценных свойств материала, которые делают данный пенопласт весьма перспективным в промышленном производстве, такие параметры нового материала, как:

- высокая термостойкость относительно имеющихся вспененных и экструдированных полимеров,
- стабильная прочность при большом давлении и высокой температуре,
- широкий диапазон плотностей,
- возможность термоформирования,
- применяемость материала в разных технологиях склейки,
- отличные теплоизоляционные характеристики.

Однако следует отметить, что многие свойства таких пенопластов, которые могут представлять интерес для расширения сферы его использования, не достаточно изучены. Целью данной работы являлось установление возможности применения данного материала в радиоэлектронике.

Исследования морфологии образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM 515, имеющего систему энергодисперсионного (EDS) микроанализа в состав которой входят Si(Li) детектор со сверхультратонким окном, охлаждаемый жидким азотом, компьютер и пакет программного обеспечения Genesis SEM Quant ZAF software, использующий матрицу ZAF коррекции при осуществлении качественного и количественного анализа [4]. Измерения проводились при значениях ускоряющего напряжения от 6,4 до 30 кВ.

Формирование контраста определяется разностью детектируемых сигналов от соседних участков образца: чем она больше, тем выше контраст изображения. Контраст зависит от нескольких факторов: топографии поверхности, химического состава объекта, поверхностных локальных магнитных и электрических полей, кристаллографической ориентации элементов структуры. Важнейшими из них являются топографический, зависящий от неровностей

поверхности образца, и контраст, зависящий от атомного состава образца.

Исследования магнитного резонанса проводились на специализированном малогабаритном анализаторе электронного парамагнитного резонанса ЭПР «Минск 22» при комнатной температуре. Рабочая длина волны – 3 см. Максимальное значение индукции магнитного поля – 450 мТл, частота модуляции – 30 кГц.

Для калибровки интенсивности сигналов объектов исследования использовался образец из монокристалла рубина ( $Al_2O_3:Cr^{3+}$ ). В процессе измерений дополнительный контроль стабильности работы спектрометра осуществлялся путем измерения калибровочного материала двухвалентного марганца ( $MgO:Mn^{2+}$ ).

На рисунке 1а и 1б представлены морфология и рентгеновские спектры пенопласта.

Из рисунка следует, что данный материал имеет однородную закрытую мелкоячеистую структуру. По всей поверхности материала видны ячейки различного размера – от 40 до 200 мкм.

Из результатов проведенного микроанализа следует, что в материале имеются следы технологической примеси Na.

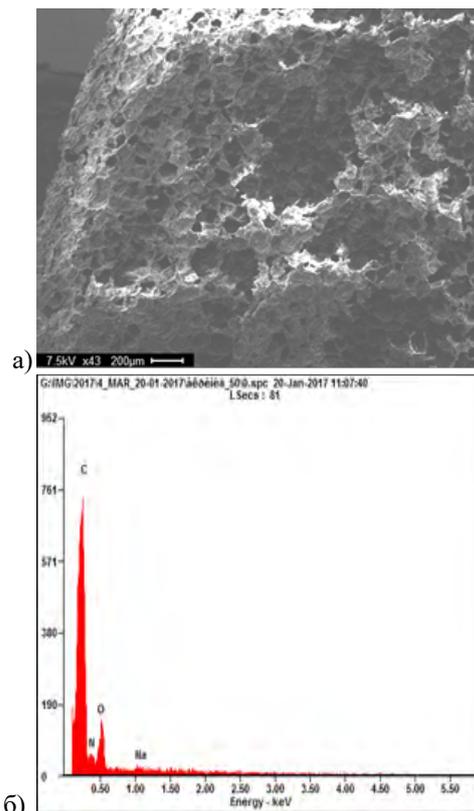


Рисунок 1 – Морфология (а) и элементный состав (б) поверхности пенопласта марки «Акримид»

На рисунке 2 приведен спектр электронного парамагнитного резонанса, полученный от исследуемого пенопласта.

Из соотношения интенсивностей сигналов заполненного резонатора и калибровочного образца следует, что нерезонансное поглощение электрической компоненты электромагнитного поля СВЧ в пенопласте незначительно. Измерения магнитного резонанса показывают, что материал относится к радиопрозрачному и не вносит магнитных и электрических потерь.

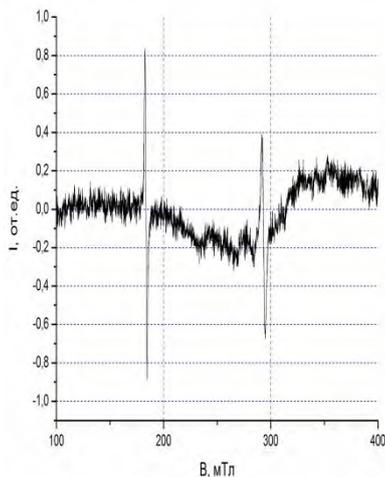


Рисунок 2 – Спектр ЭПР, полученный от пенопласта марки «Акримид»

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что пенопласт марки «Акримид», получаемый технологией вспенивания на основе поли(мет)акриламида пригоден для создания радиопрозрачных диэлектрических покрытий.

#### Литература

1. Зильберман, Е.Н., Новолокина, Р.А. Примеры и задачи по химии ВМС./ Е.Н. Зильберман, Р.А. Новолокина. – Москва: Высшая школа. – 1984. – 224 с.
2. Дорофеев, С.П., Окунев, П.А., Тараканов, О.Г. Пенопласты из сополимеров акрилонитрила / С.П. Дорофеев, П.А. Окунев, О.Г. Тараканов // Пластмассы. – 1972. – №8. – С.25-26.
3. Бессонов, М.И., Котон, М.М., Кудрявцев, В.В., Лайус, Л.А. Полиимиды – класс термостойких соединений/ М.И. Бессонов, М.М. Котон, В.В. Кудрявцев, Л.А. Лайус. – Л.:Наука. – 1983. – 328 с.
4. Iyer, B., Mathakiya, I., Shah, A., Rakshit, A. Terpolymers of acrylamide, acrylic acid and acrylonitrile: further characterization and biodegradation studies / B.Iyer, I. Mathakiya, A. Shah, A. Rakshit // Pol. International. – 2000. – V.49. – P.685-690.

УДК 539.2

### МАГНИТОРЕЗОНАНСНАЯ ДИАГНОСТИКА ПОРОШКА Y-Ba-Cu-O

Адашкевич С.В.<sup>2</sup>, Бакаев А.Г.<sup>1</sup>, Маркевич М.И.<sup>1</sup>, Стельмах В.Ф.<sup>2</sup>, Чапланов А.М.<sup>1</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Практическое применение эффекта сверхпроводимости ограничено вследствие необходимости низких температур, существования критических полей и критического тока [1–3]. Однако в некоторых областях физики сверхпроводники получили распространение, с использованием сверхпроводников создаются сильные магнитные поля для удержания плазмы в установках по управляемому термоядерному синтезу [1, 2].

В течение длительного времени усилия работающих в области сверхпроводимости, были направлены на поиск материалов с высокой критической температурой (высокотемпературная сверхпроводимость - ВТСП). Следует отметить, что открытия ВТСП материалов стало мощным стимулом разработки элементов сверхпроводниковой электроники и их использования в телекоммуникационной, приборной, компьютерной и медицинской технике [1–3]. В настоящее время разработаны, изготовлены и испытаны макеты ячейки памяти, сверхчувствительный элемент считывания на

ВТСП пленках с существенным снижением энерговыделения по сравнению с полупроводниковыми усилителями считывания, сверхскоростные линии связи, которые позволяют увеличить производительность систем в 10–100 раз. Внедрение ВТСП в вычислительную технику приводит к увеличению ее быстродействия и степени интеграции.

Широкие перспективы использования ВТСП открываются в СВЧ-технике и в создании датчиков видимого и ИК диапазона с высокой чувствительностью. Таким образом, возможности практического использования ВТСП-материалов в целом, и в частности керамики Y-Ba-Cu-O остаются многообещающими для микроэлектроники, медицины, эффективных систем производства, накопления и передачи энергии.

Целью данной работы является установление особенностей магниторезонансного поглощения СВЧ энергии керамикой Y-Ba-Cu-O.

Исследования морфологии образцов проводилось с помощью сканирующего

электронного микроскопа SEM 515, имеющего систему энергодисперсионного (EDS) микроанализа в состав которой входят Si(Li) детектор со сверхультратонким окном, охлаждаемый жидким азотом, компьютер и пакет программного обеспечения Genesis SEM Quant ZAF software, использующий матрицу ZAF коррекции при осуществлении качественного и количественного анализа [4]. Измерения проводились при значениях ускоряющего напряжения от 6,4 до 30 кВ.

Из излучаемого любым образцом рентгеновского спектра можно извлечь два вида данных: длину волны (или энергию) и количество рентгеновских лучей, излученных образцом за единицу времени. Измерение длины волны (или энергии) каждого характеристического рентгеновского луча позволяет определить, какие элементы имеются в образце, т.е. провести качественный анализ. Измерение же количества рентгеновских лучей, излученных в единицу времени, позволяет провести количественный анализ.

Исследования магнитного резонанса проводились на специализированном малогабаритном анализаторе ЭПР «Минск 22» при комнатной температуре. Рабочая длина волны – 3 см. Максимальное значение индукции магнитного поля – 450 мТл, частота модуляции – 30 кГц. Для калибровки интенсивности сигналов объектов исследования использовался образец из монокристалла рубина ( $Al_2O_3:Cr^{3+}$ ).

В процессе измерений дополнительный контроль стабильности работы спектрометра осуществлялся путем измерения калибровочного материала двухвалентного марганца ( $MgO:Mn^{2+}$ ).

На рисунке 1 представлена морфология керамики Y-Ba-Cu-O, полученная в результате исследований с помощью сканирующего электронного микроскопа.

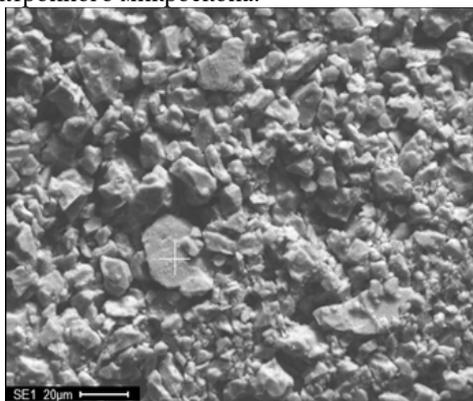


Рисунок 1 – Морфология поверхности материала

Из рисунка следует, что данный материал имеет неоднородную структуру порошка. Размер частиц составляет 5–35 мкм.

В результате дальнейших исследований были получены рентгеновские спектры керамики Y-Ba-Cu-O (рисунок 2).

Установлено, что элементный состав соответствует керамике Y-Ba-Cu-O.

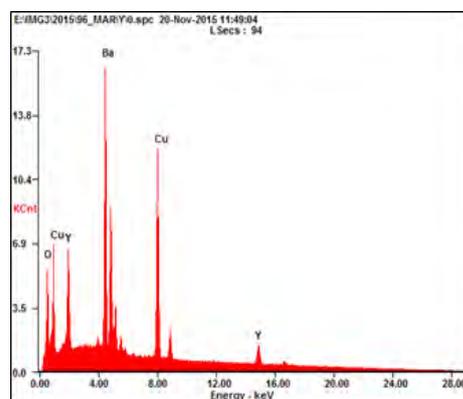


Рисунок 2 – Элементный состав поверхности материала

На спектре магнитного резонанса (рисунок 3) присутствует широкая резонансная линия в области эффективного g-фактора  $2,24 \pm 0,01$ . Ширина линии составляет ~ 104,9 мТл. Из соотношения интенсивностей сигналов заполненного резонатора и калибровочного образца следует, что нерезонансное поглощение электрической компоненты электромагнитного поля СВЧ в керамике значительно.

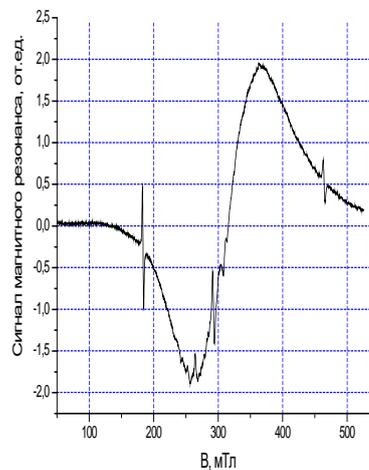


Рисунок 3 – Спектр электронного парамагнитного резонанса керамики Y-Ba-Cu-O

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что спектры порошка Y-Ba-Cu-O представляют собой неоднородно уширенные широкие линии с эффективным значением g – фактора  $2,24 \pm 0,1$  и шириной 104,9 мТл, что свидетельствует о высокой концентрации магниторезонансных центров и высоком резонансном поглощении

энергии СВЧ поля, нерезонансное поглощение также является значительным.

Литература

1. Polak, M., Kottman P., Majoros M. [et al.] Magnetic field distribution above a superconducting YBaCuO sample as an indication of sample inhomogeneities / M. Polak, P. Kottman, M. Majoros M. // Superconductor Science Technology. – 1990. – V. 3. – P. 67.

2. Hagen, C.W., Griessen, R.P., Salomons, E. Thermally activated flux motion in high Tc superconductors: an analytical model / C.W. Hagen, R.P. Griessen, E. Salomons // Physica C. – 1989. – V. 157. – P. 199.

3. Буев, А.Р. Исследование высокотемпературной высокопроводимости с помощью нового бесконтактного метода / А.Р. Буев // Известия вузов. Поволжский регион. – 2004. – № 5. – С. 98-104.

УДК 621.382

## О КВАНТОВАНИИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КАНАЛЕ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Жевняк О.Г., Жевняк Я.О.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Как хорошо известно, в инверсионных слоях кремния возникает квантование энергии электронов в связи с тем, что средняя толщина этих слоев (около 10 нм) сравнима с длиной волны де Бройля электронов [1]. Форма квантовой ямы инверсионного слоя имеет треугольный вид, в результате чего расчет квантовых состояний электронов возможен только с помощью численного решения уравнения Шрёдингера для треугольной ямы [1, 2]. Проводящий канал короткоканальных МОП-транзисторов, являющихся основным элементом современных микропроцессоров, по сути представляет собой обедненную область на поверхности кремния, включающую в себя и инверсионный слой (если он сформируется). В этой связи квантование энергии электронов в инверсионном слое кремния может оказывать определенное влияние на характеристики МОП-транзисторов. Однако короткоканальный эффект, обусловленный сравнимостью размеров областей истока и стока транзистора с его длиной канала, может значительно исказить это влияние [3, 4]. В связи с тем, что затворное и стоковое напряжения в МОП-транзисторе включены навстречу друг другу, и глубина стоковой области достаточно велика, квантование энергии электронов в определенных участках канала будет исчезать, так как в них будет наблюдаться существенное расширение проводящего канала – до размеров заметно больших длины волны де Бройля электронов [4].

Целью настоящего доклада явилось изучение условий, при которых квантование энергии электронов в канале короткоканального МОП-транзистора будет существенным. В основе данного изучения лежит двухэтапная схема. Вначале проводилось численное моделирование электронного переноса в канале МОП-транзистора с помощью метода Монте-Карло (см., например, [3-5]). В результате моделирования путем численного решения уравнения Пуассона и

кинетического уравнения Больцмана рассчитывались потенциальные профили  $U(z)$  проводящего канала в глубь подложки МОП-транзистора. Далее для выбранных профилей осуществлялось численное решение уравнения Шрёдингера в виде:

$$\psi'' + 2m/\hbar^2 (E - U(z))\psi = 0.$$

Профиль  $U(z)$  аппроксимировался линейной функцией, что позволяло решить уравнение Шрёдингера с помощью степенных рядов (см., например, [6]) и рассчитать энергетические уровни. Если расстояние между ближайшими уровнями заметно превышало величину  $k_B T$ , то в яме возникало размерное квантование, в противном случае – оно отсутствовало.

На рис. 1 приведена схема моделируемого МОП-транзистора. Рассматривались два типа приборов – с глубоким (стандартным) стоком (глубина залегания  $x_j = 0,1$  мкм) и мелким стоком ( $x_j = 0,01$  мкм). Напряжение на стоке  $V_D = 1$  В, а напряжение на затворе  $V_G = 1$  В и  $V_G = 3$  В. Остальные параметры транзистора были следующими:  $L_{ch} = 0,4$  мкм,  $d_{ox} = 6$  нм,  $N_D = 5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_A = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ .

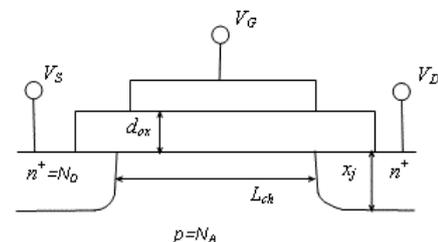


Рисунок 1 – Схема конструкции моделируемого МОП-транзистора

На рисунках 2 – 3 приведены полученные в результате моделирования профили для двух сечений канала в глубь подложки: в начальной части канала (на расстоянии около  $0,2 L_{ch}$  от истока) – штриховые кривые и вблизи стока (около  $0,1 L_{ch}$  от стока) – непрерывные кривые.

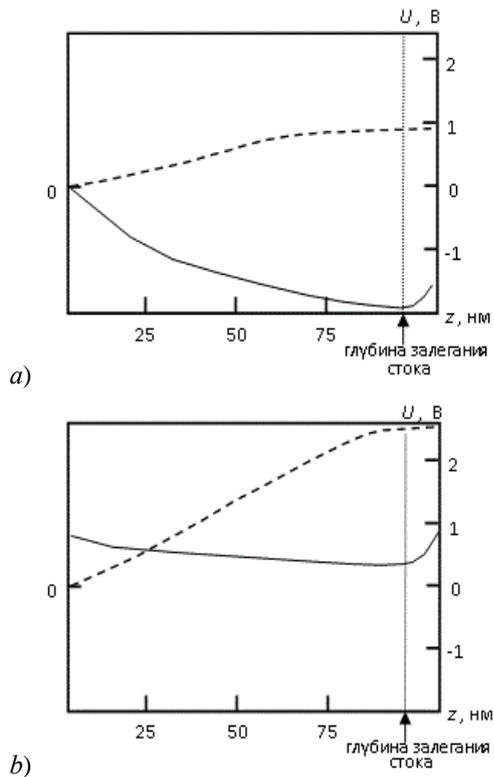


Рисунок 2 – Рассчитанные потенциальные профили для проводящего канала транзистора с глубоким стоком: *a* –  $V_G = 1$  В; *b* –  $V_G = 3$  В

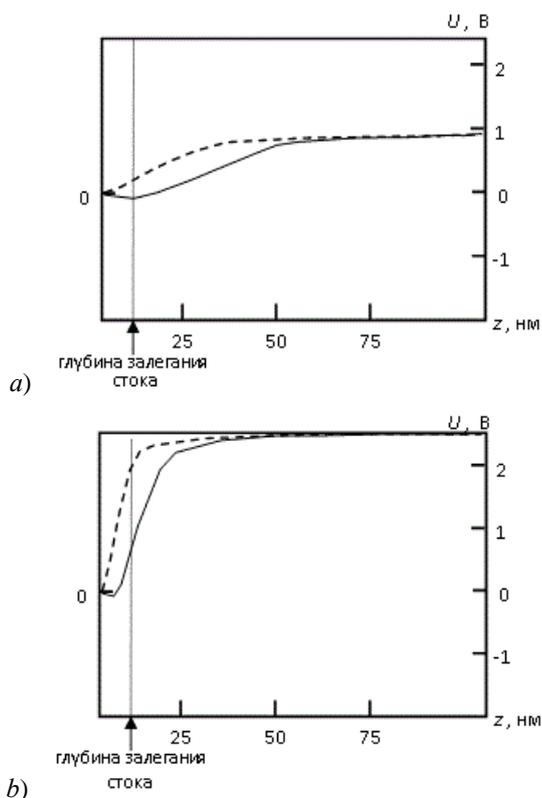


Рисунок 3 – Рассчитанные потенциальные профили для проводящего канала транзистора с мелким стоком: *a* –  $V_G = 1$  В; *b* –  $V_G = 3$  В

Полученные профили для МОП-транзисторов с глубоким стоком показывают, что только в начале канала формируется яма, близкая по форме к треугольной. Однако ее глубина и ширина таковы, что в ней не возникает размерное квантование. Вблизи стока для рассматриваемых условий инверсионный слой вообще отсутствует (так называемая отсечка канала).

Для транзистора с мелким стоком размерное квантование при  $V_G = 1$  В также не возникает. И только при  $V_G = 3$  В оно возникает и при этом в существенно выраженном виде на большей части канала, но вблизи стока также исчезает. Очевидно, что появление размерного квантования в данном случае обусловлено подавлением короткоканального эффекта в приборах с мелким стоком при больших напряжениях на затворе.

Таким образом, в настоящей работе на основе численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса и численного решения уравнения Шредингера показано, что квантование энергии электронов в проводящих каналах короткоканальных МОП-транзисторов может быть существенным только для приборов с мелкими стоками и при напряжениях на затворе, превышающих напряжение на стоке. В большинстве остальных случаев квантование вообще не возникает, либо его влияние несущественно.

#### Литература

1. Андо Т., Фаулер А, Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. – Москва: Мир, 1985. – 416 с.
2. Fischetti M. V., Laux S. E. Monte Carlo study of electron transport in silicon inversion layers // Phys. Rev. B. – 1993. – Vol. 48, Iss. 4. – P.2244–2274.
3. Борздов В.М., Жевняк О.Г., Комаров Ф.Ф., Галенчик В.О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники – Минск: БГУ, 2007. – 175 с.
4. Zhevnyak O., Borzdov V., Borzdov A., Pozdnyakov D., Komarov F. Monte Carlo study of influence of channel length and depth on electron transport in SOI MOSFETs // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1L-1–8.
5. Zhevnyak O. Temperature effect on electron transport in conventional short channel MOSFETs: Monte Carlo simulation // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1M-1–8.
6. Жевняк О. Г. Коэффициенты туннелирования электронов через потенциальные барьеры треугольной и ступенчатой формы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – Вып. 9, Ч. 3. – С. 46–48.

УДК 53.082.5:535.012

## ДЕЙСТВУЮЩИЙ МАКЕТ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

Смирнов А.Г., Рыжевич А.А., Агашков А.В.

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

В соответствии с Задаанием 5.4. ОКР "Луч" нами был разработан, собран и протестирован действующий макет устройства для детектирования поверхностных и приповерхностных дефектов малых размеров, позволяющий, позволяющий сканировать круглую пластину диаметром до 200 мм в скоростном режиме и формировать цифровое качественное изображение ее поверхности с разрешением менее 50 мкм.

Функциональная схема модуля приведена на рисунке 1.

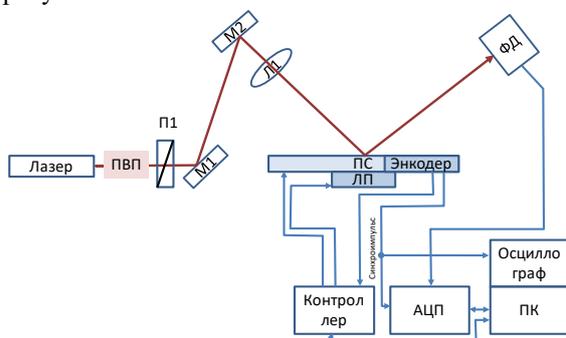


Рисунок 1 – Макет устройства для детектирования дефектов: ПВП – полуволновая пластинка, П1 – линейный поляризатор, М1,2 – зеркала, Л1 – линза, ПС – поворотный стол, ЛТ – линейный транслятор, ПК – персональный компьютер, ФД – фотодиод, АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Линейно поляризованное излучение He-Ne лазера при помощи двух зеркал, закрепленных в кинематических держателях, направляется под углом 45 градусов на образец, помещенный на сканирующую платформу. Сканирующая платформа состоит из поворотного стола, RSMR-T-36-115-25-KF-AM (Рухсервомотор), и линейного транслятора, 8T167-100 (Standa). Перемещение сканирующей платформы осуществляется при помощи сервоконтроллера. Для регулировки мощности излучения от лазера с макс. мощностью 5 мВт на выходе лазера помещается полуволновая пластинка и линейный поляризатор. Излучение лазера фокусируется на поверхность образца сферической линзой с фокусным расстоянием 150 мм. Отраженное от поверхности образца лазерное излучение попадает на фотоприемник (PD101, Thorlabs), сигнал с которого оцифровывается аналого-цифровым преобразователем, в качестве которой используется многофункциональная карта NI DAQ6221USB (National Instruments). При попадании фокусного пятна на дефект происходит

изменение мощности рассеянного излучения, благодаря чему может быть зафиксировано наличие этого дефекта.

При сборке макета требовалось уделить внимание точной юстировке. Пятно излучения лазера в размере составляло около 100 мкм. Для достижения требуемого разрешения и исключения искажения изображения обеспечивалось совмещение положения лазерного пятна с центром вращения пластины, установленной линейным транслятором в нулевой точке, с точностью не хуже 50 мкм. Для точного совмещения использовалась цифровая камера с широкоугольным объективом, расположенными на некоторой высоте над сканирующей платформой, и метод, основанный на обработке последовательности снимков поверхности поворотного стола, снятых при положениях в 0, 90 и 270 градусов. После обработки снимков определялся пиксел камеры, соответствующий центру вращения стола. Затем в режиме реального времени по камере производилось совмещение лазерного пятна с центром вращения, который подсвечивался на изображении визиром. Поскольку центр вращения расположен в полости части ротора мотора, для получения изображения пятна лазера на камере мотор посредством линейного транслятора перемещался так, чтобы лазер освещал металлический обод ротора. Для получения четкого изображения также необходимо было точно сфокусировать лазер на поверхность пластины с точностью не хуже 10 мкм. Для этого фокусирующая линза крепилась в держателе с шестью степенями свободы, обеспечиваемыми микрометрическими винтами.

Управление макетом осуществлялось при помощи персонального компьютера (ПК), к которому были подключены два сервоконтроллера сканирующей платформы и карта АЦП NI DAQ6221USB. Подключение поворотного стола производилось по следующей схеме. Питание от двухфазной сети подводилось на контроллер Kollmorgen S300, который осуществлял преобразование тока и питал поворотный двигатель. Дополнительно к контроллеру подавалось питание 24 В для осуществление программного управления. Клеммы блокировки двигателя STO и Enable были закорочены. Контроллер был подключен к персональному компьютеру по интерфейсу RS232. Синхронимпульс нулевой метки энкодера (разъем X5) подавался на осциллограф для контроля и на цифровой вход PFI0 карты NI DAQ6221USB. Управление линейным транслятором

осуществлялось через контроллер, подключенный к ПК по интерфейсу USB. Сигнал с фотодиода после усиления (встроенный усилитель фотодиода), подавался на аналоговый вход ад карты NI DAQ6221USB. Карта подключалась к ПК также через интерфейс USB. Для управления макетом системы регистрации было разработано программное обеспечение на C++ для подключения указанных аппаратных средств в среде Matlab. Также был разработан программный скрипт, реализующий логику синхронизации компонент системы. Отметим, что для преобразования формата изображения из полярной системы координат в декартову используется двумерная интерполяция на неоднородной сетке.

Макет тестировался в режиме скоростного сканирования. В качестве исследуемого объекта использовалась внутренняя часть ротора поворотного стола, представляющего собой металлический диск диаметром 100 мм с 8 отверстиями диаметром 5 мм, расположенных по окружности диска. Для обеспечения точной синхронизации системы регистрации с вращением стола предварительно были произведены замеры реальной скорости вращения поворотного стола и тактовой частоты карты NI DAQ6221USB. Для этого на осциллографе Tetronix измерялся период опорного сигнала с энкодера и сравнивался с номинальным. Для поворотного стола абсолютная погрешность воспроизведения номинальной и реальной скорости вращения составила  $5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ . Это достаточно значимая величина, поскольку с учетом того, что время пролета луча над одной точкой составляет около 50 мкс, за время сканирования запаздывание составит полный оборот. Для компенсации запаздывания была введена коррекция скорости вращения посредством интерполяции, что улучшило точность воспроизведения частоты в 102 раза. Для достижения оптимального режима сканирования скорость вращения стола и частота оцифровки АЦП согласовывались между собой, исходя из максимально достижимой скорости перемещения линейного транслятора. Оптимальная скорость вращения составила 200 об/мин, частота выборки – 10 кВыб/сек.

В процессе тестов сканировалась внутренняя часть обода ротора поворотного стола. На рисунке 2 приведен типичный оцифрованный сигнал с фотодиода. Максимальная амплитуда усиленного сигнала составила около 4 В. В сигнале присутствуют провалы, который соответствуют прохождению лазерного луча по отверстиям в диске. Относительный уровень шума сигнала составил около 1 %. Изрезанный профиль сигнала обусловлен сильной шероховатостью поверхности

диска, которая приводит к рассеиванию лазерного луча. При неподвижном линейном трансляторе сигнал стабилен, что демонстрирует точную синхронизацию.

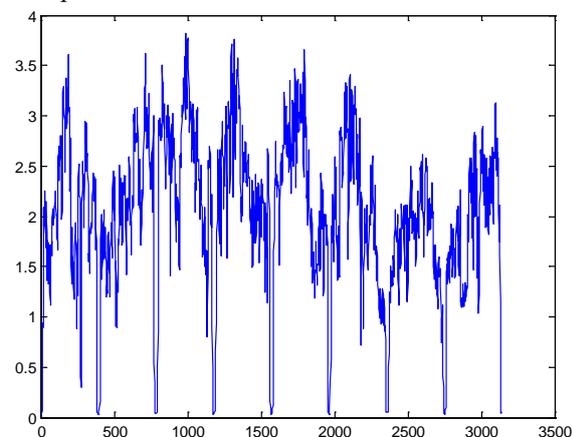


Рисунок 2 – Оцифрованный сигнал с фотодиода; ось x – номер выборки, ось y – амплитуда, провалы соответствуют отверстиям на диске

Для оценки достижимого пространственного разрешения на ротор была закреплена стеклянная пластинка с нанесенной решеткой периодом в 1 мм с линиями толщиной 12 мкм. На рисунке 3 приведено полученное изображение решетки. Частота дискретизации была выбрана исходя из разрешения в 50 мкм, при этом размер пятна лазера составлял около 100 мкм. Как видно, линии достаточно легко разрешаются, а это означает, что достигнуто разрешение не менее 12 мкм.

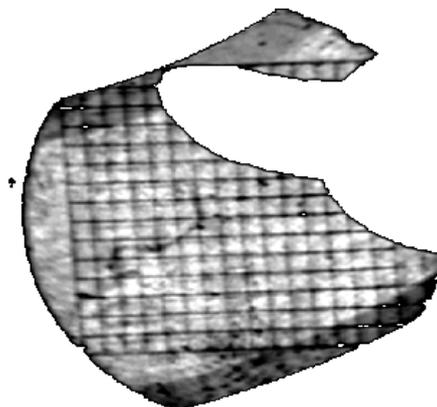


Рисунок 3 – Изображение паттерна

При достижимой скорости вращения 500 об/мин полное время сканирования пластины диаметром 100 мм с разрешением 50 мкм составляет 4 минуты. При этом частота циклов съема/обработки данных равна 120 кВыб/мин.

УДК 621.3.023

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИКСАТОРОВ ДИСТАЛЬНОГО ОТДЕЛА БОЛЬШЕБЕРЦОВОЙ КОСТИ

Кукареко В.А.<sup>1</sup>, Ситник А.А.<sup>2</sup>, Соломахо В.Л.<sup>3</sup>, Шапарь В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> РНПЦ травматологии и ортопедии, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup> Республиканский институт инновационных технологий, Минск, Республика Беларусь

Совершенствование методов лечения переломов дистального отдела большеберцовой кости является актуальной проблемой современной травматологии. Это связано как с распространенностью подобного вида травм, так и с высокой вероятностью развития осложнений при их лечении. Перспективными направлениями улучшения результатов лечения являются проведение тщательных диагностических исследований, применение современной этапной тактики лечения, методов малоинвазивного остеосинтеза, использование анатомически изогнутых фиксаторов с блокированием винтов [1].

В связи с вышесказанным важной задачей является освоение выпуска отечественных имплантатов, соответствующих необходимым требованиям и имеющих более низкую, по сравнению с зарубежными аналогами, цену. В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси были проведены испытания образцов фиксаторов на сопротивление разрушению в условиях знакопеременного нагружения, характерного для реальных условий функционирования вживленных имплантатов.

Рассматриваемые фиксаторы предназначены для обеспечения репозиции и стабильной внутренней фиксации переломов дистального отдела большеберцовой кости до достижения сращения перелома. Проведенное ранее компьютерное моделирование позволило оптимизировать форму и размеры фиксаторов, выполнить анализ напряженно-деформированного состояния системы «большеберцовая кость – фиксатор» для различных типов переломов [2].

В комплект фиксатора входят медиальная накладная пластина переменной толщины, соответствующая изгибам медиальной поверхности дистального отдела большеберцовой кости (рисунок 1, а) и переднелатеральная пластина, соответствующая изгибам переднелатеральной поверхности большеберцовой кости (рисунок 1, б).

Имплантаты изготовлены из титана марки ВТ1-00 или титанового сплава. Выполненный анализ напряженно-деформированного состояния исследуемой системы «дистальный отдел большеберцовой кости - фиксатор» для случаев фиксации переломов медиальной и переднелатеральной накладными пластинами показал, что при действии на фиксаторы вертикальной силы они изгибаются. Проведенные

расчеты показали, что в случае наиболее тяжелых переломов (тип 41А3) фиксаторы изгибаются в сторону кости (сторону смыкания перелома).



Рисунок 1 – Образцы накладных пластин для фиксации дистального отдела большеберцовой кости: а) – медиальная; б) – переднелатеральная

Наиболее напряженные зоны фиксаторов находятся вблизи места крепления фиксатора к нижней части большеберцовой кости в участках, ослабленных отверстиями для крепежных винтов.

В результате расчетов максимальных деформаций изгиба хвостовиков медиальной и переднелатеральной пластин в горизонтальной плоскости при самых неблагоприятных условиях были установлены верхние предельные значения деформации  $\epsilon_a^{кр}$ , равные 1,1 мм для медиальной пластины и 2,0 мм – для переднелатеральной. В качестве базовой нагрузки, имитирующей массу пациента, принималась сила, равная 1000 Н.

Натурные усталостные испытания экспериментальных образцов медиальной и переднелатеральной накладных пластин (фиксаторов) проводились в условиях циклической деформации изгиба хвостовика с заданной амплитудой  $\epsilon_a$  отнулевого цикла деформаций [3]. Хвостовики пластин жестко крепились к стержням, имитирующим большеберцовую кость. При указанных условиях в поверхностных слоях фиксаторов возникают растягивающие напряжения, аналогичные напряжениям, образующимся в теле закрепленного на кости имплантата при действии на него сосредоточенной силы. Заданная циклическая долговечность при испытаниях фиксаторов  $N = 1 \cdot 10^6$  (без разрушения).

Перед проведением испытаний на циклическую долговечность образцы фиксаторов подвергались статическому консольному изгибу на универсальной испытательной машине INSTRON Satec 300LX для определения зависимости деформации изгиба хвостовика фиксатора  $\epsilon_a$  от приложенной силы  $P$ . На рисунке 2 приведена схема испытаний на консольный изгиб фиксаторов с жестко зафиксированным

хвостовиком (на примере медиальной накладной пластины).

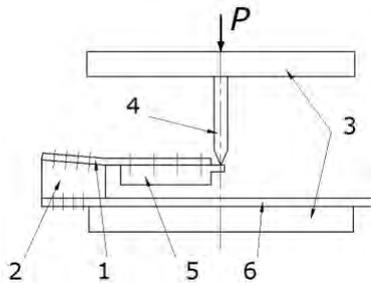


Рисунок 2 – Схема определения зависимости деформации хвостовика пластины от приложенной силы: 1 – медиальная пластина; 2 – адаптер; 3 – захваты; 4 – нож; 5 – стержень; 6 – основание

Испытания трансплантатов на циклическую долговечность проводились на модернизированном стенде для усталостных испытаний фиксаторов УИФ (рисунок 3). Основными функциональными узлами стенда являются привод, нагружатель пластин-фиксаторов с устройством для крепления хвостовиков и устройство крепления головных частей медиальной и переднелатеральной пластин фиксаторов.

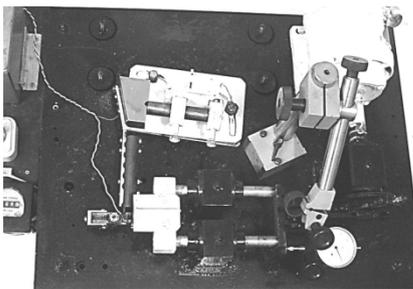


Рисунок 3 – стенд для усталостных испытаний фиксаторов дистального отдела большеберцовой кости с жесткой фиксацией хвостовиков

Кривошипно-шатунный механизм привода преобразует вращательное движение вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение штоков нагружателя, перемещающихся в цилиндрических направляющих. Частота возвратно-поступательных колебаний  $f = 25$  Гц. Длина хода штоков (амплитуда  $e_a$ ) устанавливается регулировкой узла эксцентрика кривошипно-шатунного механизма в пределах  $0...15$  мм и контролируется индикатором часового типа с ценой деления  $0,01$  мм. Узел крепления головной части пластин-фиксаторов содержит сварную оправку, на которой размещаются сменные адаптеры. Конструкцией стенда предусмотрены автоматическое выключение при разрушении образца, регистрация времени испытаний, проведение испытаний с иными значениями асимметрии цикла, вплоть до симметричного цикла.

На рисунках 4, 5 представлены результаты испытания на усталость усовершенствованных

образцов фиксаторов дистального отдела большеберцовой кости (в конструкцию фиксаторов были внесены изменения по результатам предварительных испытаний экспериментальных образцов).

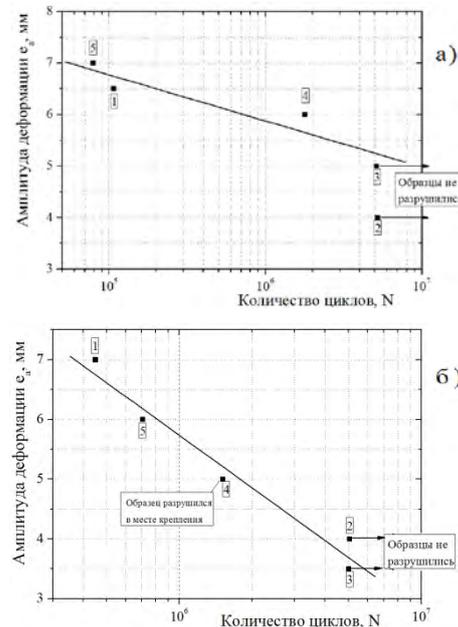


Рисунок 4 – Результаты усталостных испытаний усовершенствованных образцов имплантатов: а) – медиальная пластина; б) – переднелатеральная пластина

В результате испытаний усовершенствованных образцов фиксаторов установлено, что циклическая долговечность  $N=1,0 \times 10^6$  переднелатеральных накладных пластин обеспечивается при значении  $e_a \approx 5,7$  мм, что существенно превышает критические уровни  $e_a^{KP}=2,0$  мм для частично разрушенного сустава и  $e_a^{KP}=5,2$  мм для незакрепленного (разрушенного) сустава. Аналогичная циклическая долговечность медиальных пластин имеет место при  $e_a \approx 5,8$  мм (для сравнения:  $e_a^{KP}=1,1$  мм для частично разрушенного сустава и  $e_a^{KP}=2,2$  мм для незакрепленного, т.е. разрушенного, сустава).

#### Литература

1. Ситник А.А. Диагностика и лечение переломов дистального отдела большеберцовой кости // Медицинские новости. – 2003. – № 67. – С. 31-35.
2. А.А. Ситник, В.А. Кукареко, А.С. Ковеня, Д.А. Чернышев. Разработка и конечно-элементное моделирование фиксатора большеберцовой кости на основе данных компьютерной томографии // Механика: Материалы докладов V Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике. – Минск: ОИМ НАН Беларуси. – 2011. – С. 423-428.
3. ГОСТ 23207-78. Соппротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М: Издательство стандартов, 1981.

УДК 621.822.71:666.22.037

## ВЫБОР НАГРУЗКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ШАРИКОВ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ И КОЛЬЦОМ

Щетникович К.Г., Кучер А.О.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Шлифование шариков соосным инструментом обеспечивает высокую точность обработки, так как в процессе перемещения заготовок по канавкам происходит приработка рабочих поверхностей шариков. Однако недостатком традиционным методом обработки шариков между двумя дисками в кольцевых канавках является низкая производительность обработки, так как шлифование осуществляется в условиях трения качения.

Введение в технологическую систему неподвижного кольца базирующегося на обрабатываемых шариках позволяет увеличить число поверхностей контакта инструмента с шариком до четырех. Качение шариков становится невозможным и увеличение проскальзывания шариков в зоне обработки значительно повышает скорость съема припуска.

Рассмотрим нагрузки в точках контакта шарика с инструментом и кольцом при усилении нагрузки верхнего диска на один шарик  $P_m$  и неподвижного кольца  $P_s$ . Обозначим нагрузки действующие на шарик в осевой плоскости через  $P_B$ ,  $P_E$ ,  $N_K$ ,  $N_A$  (рисунок 1).

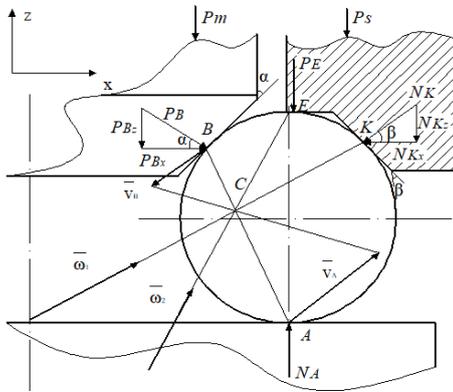


Рисунок 1 – Положения оси вращения шара при изменении соотношения нагрузок на диск и кольцо

Проекция сил на вертикальную и горизонтальную оси найдем из векторных треугольников:

$$P_{Bz} = P_m; P_{Bx} = P_{Bz} / \operatorname{tg} \alpha = P_m / \operatorname{tg} \alpha; \\ P_B = P_{Bz} / \sin \alpha.$$

Для нахождения остальных нагрузок спроектируем силы оси координат:

$$\sum X = 0: P_{Bx} - N_{Kx} = 0; N_{Kx} = P_{Bx} = P_m / \operatorname{tg} \alpha. \\ \sum Z = 0: N_A - P_{Bz} - P_E - N_{Kz} = 0.$$

Из последнего уравнения следует, что

$$N_A = P_{Bz} + P_E + N_{Kz}.$$

Так как  $P_E + N_{Kz} = P_s$ , то

$$N_K = P_s + P_{Bz} = P_s + P_m.$$

Силу  $N_K$  и ее вертикальную составляющую силы  $N_{Kz}$ , определим из треугольника, построенного в точке K

$$N_{Kz} = N_K \cdot \operatorname{tg} \beta; \\ N_K = N_{Kx} / \cos \beta = P_m / \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha; \\ N_{Kz} = P_m \cdot \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha; \\ P_E = P_s - N_{Kz} = P_s - P_m \cdot \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha.$$

Устойчивое положение кольца при обработке будет в случае, когда  $P_E > 0$ , следовательно

$$P_s > P_m \cdot \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

При выполнении условия (2) достигается двухточечный контакт шарика с кольцом. Из последнего неравенства следует, что минимальное соотношение величин нагрузок на неподвижное кольцо и верхний диск должно удовлетворять условию

$$P_s / P_m > \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha.$$

Силовое замыкание кольца базирующегося исключительно на обработке шарика обеспечивает определенность его положения в осевом и радиальном направлениях. В этом случае обеспечивается четырехточечный контакт шарика с инструментом, определенное положение кольца в осевом и радиальном направлении и стабильная кинематика обрабатываемых шариков.

При небольших нагрузках на кольцо, по сравнению с нагрузкой на верхний диск, наибольшее давление инструмента на шарик будет в точках A, B и K в которых будет наблюдаться трение качения, а в точке E будет иметь место трение скольжения. Мгновенная ось вращения (МОВ) шарика будет проходить через неподвижную точку K на кольце и полюс C скоростей точек A и B.

Положение МОВ шарика можно изменить, если увеличить нагрузку на кольцо. Из выражения (1) видно, что давление на шарик в точке K не зависит от нагрузки на кольцо, а целиком определяется осевой нагрузкой на диск и значением углов конических фасок. Так как давление в точке E определяется разностью нагрузки на кольцо и вертикальной составляющей  $N_{Kz}$ , то имеется, возможность изменить силу  $P_E$  не влияя, на силу  $N_K$ . При большом давлении в точке E из-за увеличения силы трения МОВ изменит свое положение и будет проходить уже через точку E. Сила в точке E должно превышать силу в точке K, т. е.  $P_E > N_K$

$$P_s > P_m / \operatorname{tg} \alpha \cdot ((1 + \sin \beta) / \cos \beta). \quad (3)$$

При большом давлении в точке E из-за увеличения силы трения МОВ изменит свое положение и будет проходить уже через точку C.

Из неравенства (3) следует, что изменение положения МОВ шарика произойдет при следующем соотношении нагрузок кольцо и верхний диск.

$$P_s / P_m > (1 + \sin \beta) / \operatorname{tg} \alpha \cos \beta. \quad (4)$$

Это неравенство определяет границу максимального соотношения нагрузок, при котором дальнейшее увеличение нагрузки на кольцо нецелесообразно.

Условием формообразования сферической поверхности шарика является непрерывное изменение положения его МОВ, а точнее угла наклона оси вращения шарика к оси инструмента. При выборе соотношения статических нагрузок, близком к значению при котором

наблюдается изменение МОВ мгновенное соотношение давлений в точках контакта  $E$  и  $K$  из-за вибрации в технологической системе, будет изменяться вблизи граничного значения.

Высокая вероятность случайных изменений положения МОВ обеспечивает постоянную переориентацию шарика в пространстве и достижение высокой точности обработки. Практически соотношения нагрузок выбирают несколько меньшей чем по условию (4), что обеспечивает основное вращение шарика вокруг мгновенной оси  $\omega_1$  с периодическими кратковременными поворотами вокруг мгновенной оси  $\omega_2$ .

УДК 620.179.14

### ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ КОЭРЦИТИМЕТРОМ КИПФ-1

Счастный А.С., Осипов А.А., Бурак В.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одной из важнейших задач современного машиностроения является обеспечение работоспособности и долговечности изделий. Анизотропия листового проката сталей, используемых в машиностроении, оказывает влияние на качество и экономичность механической обработки (резка, штамповка и т.д.), причем это влияние неоднозначно и зависит от ряда факторов. Учет анизотропии позволяет повысить качество как изготавливаемой продукции, так и повысить технологичность производства.

В работах [1–3], проведенных коллективом авторов, было показано, что импульсный магнитный метод с направленным намагничиванием обладает высокой чувствительностью к направлению прокатки. В приведенной работе [2] преобразователь коэрцитиметра отстоял на 10 мм от края образца, вследствие чего области измерения коэрцитивной силы вдоль и поперек направления прокатки образцов не совпадали, и наличие неоднородности листа могло привести к изменению полученных коэффициентов корреляции.

Исследовалось влияние смещения преобразователя коэрцитиметра от центра листа к углу на образцах холоднокатаной стали 35 (размером 200 x 200 x 1,5 мм<sup>3</sup>) и 08Ю (размером 200 x 200 x 1 мм<sup>3</sup>). Образцы были подвергнуты отжигу при температуре 400 °С. Измерения коэрцитивной силы осуществлялись с использованием коэрцитиметра Кипф-1 [4, 5]. Наконечники коэрцитиметра имели размеры 12 x 28 мм<sup>2</sup>, расстояние между центрами наконечников составляло 45 мм.

Преобразователь коэрцитиметра устанавливался в центр исследуемого образца, а затем

передвигался вдоль диагонали с шагом 10 мм до тех пор, пока наконечники не выходили на край образца. Проводились измерения коэрцитивной силы  $H_{ск}$  как вдоль, так и поперек направления прокатки (рисунок 1).

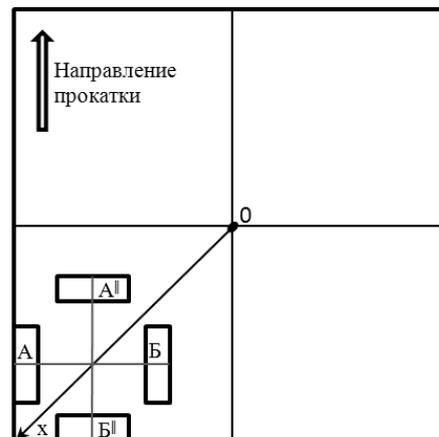


Рисунок 1 – Схематическое расположение наконечников коэрцитиметра (А, Б – поперек направления прокатки, А', Б' – вдоль направления прокатки)

При таком методе измерения коэрцитивная сила вдоль и поперек направления прокатки определялась в одной области образца, что позволило снизить влияние неоднородности магнитных свойств исследуемых листов.

По результатам измерений вычислялся коэффициент магнитной анизотропии как отношение максимальной коэрцитивной силы к минимальной коэрцитивной силе  $H_{сmax}/H_{сmin}$ .

Результаты измерения коэрцитивной силы вдоль и поперек направления прокатки на исследуемом образце холоднокатаной стали 35 представлены на рисунке 2. На рисунке 3

представлены результаты измерения коэрцитивной силы вдоль и поперек на направления прокатки на образце холоднокатаной стали 08Ю.

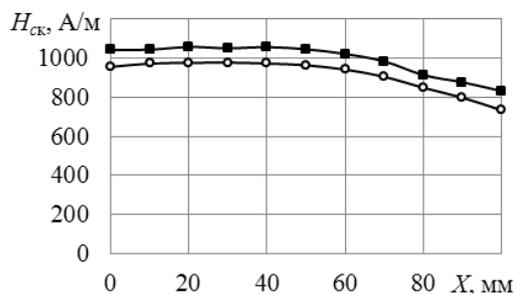


Рисунок 2 – Зависимость коэрцитивной силы  $H_{ск}$  (○ – поперек направления прокатки  $H_{ск90}$ , ■ – вдоль направления прокатки  $H_{ск0}$ ) при смещении от центра образца стали 35

Из представленных на рисунках 2 и 3 зависимостей видно, что значения коэрцитивной силы, измеренные вдоль и поперек направления прокатки, различаются. В обоих случаях имеется участок, характеризующийся стабильностью измеряемого магнитного параметра ( $\pm 5\%$ ) при смещении преобразователя коэрцитиметра от центра на расстояние не более 60 мм.

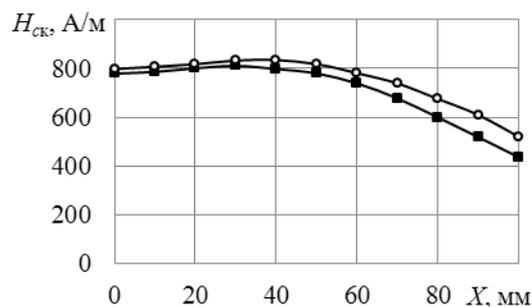


Рисунок 3 – Зависимость коэрцитивной силы  $H_{ск}$  (○ – поперек направления прокатки  $H_{ск90}$ , ■ – вдоль направления прокатки  $H_{ск0}$ ) при смещении от центра образца холоднокатаной стали 08Ю

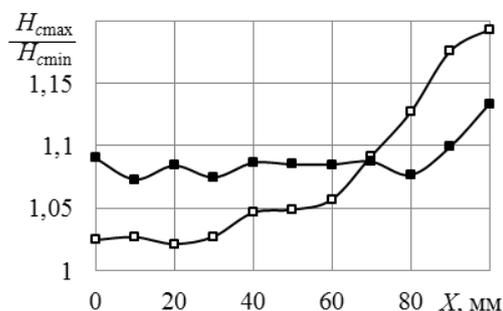


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента анизотропии  $H_{сmax}/H_{сmin}$  (□ –  $H_{ск90}/H_{ск0}$  холоднокатаная сталь 08 Ю, ■ –  $H_{ск0}/H_{ск90}$  холоднокатаная сталь 35) коэрцитивной силы при смещении от центра образца к углу

Однако при исследовании образца холоднокатаной стали 08Ю величина коэрцитивной силы  $H_{ск90}$ , измеренной поперек направления прокатки, больше чем величина коэрцитивной силы  $H_{ск0}$ , измеренной вдоль направления прокатки, в отличие от холоднокатаной стали 35, где  $H_{ск0}$  больше чем  $H_{ск90}$ .

В связи с тем, что величина  $H_{ск0}$  меньше величины  $H_{ск90}$  (на всем участке измерения) для холоднокатаной стали 08Ю коэффициент магнитной анизотропии рассчитывался как  $H_{ск90}/H_{ск0}$  (рисунок 4).

Из полученных на рисунке 4 зависимостей следует, что коэффициент магнитной анизотропии при смещении до 60 мм от центра листа сохраняет стабильность (отклоняется не более чем на 1,5% от среднего значения коэрцитивной силы для образца стали 35 и не более 5% для образца стали 08Ю).

Из рисунка 4 также видно, что со смещением коэрцитиметра от центра к углу образца на 90 мм и более, а для стали 08Ю на 70 мм и более наблюдается резкое изменение коэффициента магнитной анизотропии коэрцитивной силы.

Таким образом, наибольшая величина коэффициента магнитной анизотропии наблюдается на максимально близком к углу образца расстоянии (рисунок 1).

С учетом размеров исследуемого образца и области измерения было установлено, что центр области измерения должен находиться на расстоянии от 40 до 50 мм от угла образца для обеспечения наибольшего коэффициента магнитной анизотропии.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что для определения направления прокатки на листах холоднокатаных сталей 08Ю и 35 может быть использован коэрцитиметр КИПФ-1. Из рисунка 4 видно, что коэффициент магнитной анизотропии  $H_{сmax}/H_{сmin}$  имеет наибольшие значения при максимальном смещении от центра к углу образца.

#### Литература

1. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20-33.
2. Счастный, А.С. Механическая анизотропия и параметры петли магнитного гистерезиса листового проката низкоуглеродистых сталей / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 15-27.
3. Счастный, А.С. Исследование возможности использования приборов магнитного контроля для оценки механической анизотропии листового проката / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 54-66.
4. Матюк, В.Ф. Коэрцитиметр КИПФ-1 / В.Ф. Матюк [и др.] // Технология, оборудование,

автоматизация, неразрушающий контроль процессов нагрева и упрочнения деталей на машиностроительных предприятиях: материалы Международной научно-технической конференции. – Минск: БГПУ, 2002. – С. 129-130

5. Матюк, В.Ф. Цифровой коэрцитиметр КИПФ-1 / В.Ф. Матюк [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. материалы Международной научно-технической конференции. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2004. – С. 275-276.

УДК 519.237

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Волошко О.В., Выслоух С.П.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

Для современной технологии приборостроения характерно использование значительного количества конструкционных материалов, которые применяются для изготовления деталей приборов. Эти материалы отличаются между собой химическим составом, физико-механическими свойствами, условиями механической и термической обработки и др.

Таким образом, любой конструкционный материал, можно однозначно представить в виде множества значений признаков (характеристик)

$$KM_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{il}\}, i=1, 2, \dots, m,$$

где  $z_{ij}$  – значение  $i$ -го признака  $j$ -го конструкционного материала;  $m$  – количество рассмотренных материалов;  $l$  – количество признаков, характеризующих каждый материал.

Свойства материалов задаются в виде огромных информационных массивов со значительным количеством составляющих параметров. Поэтому при исследовании таких многопараметрических систем возникает необходимость исключить некоторые из параметров, сохранив при этом всю их информативность.

Одним из самых распространенных видов представления данных о системе есть многомерная матрица, строки которой соответствуют отдельным объектам системы (наименования конструкционного материала), которые описываются набором конкретных значений параметров, а столбцы – разные наборы конкретных значений параметров этих объектов. На практике размеры рассматриваемых матриц могут быть достаточно большими.

Непосредственный, визуальный анализ таких матриц практически невозможен и их использование в расчетах вызывает значительные трудности. Поэтому в математической статистике возникло много подходов и методов, предназначенных для того, чтобы сжать исходную информацию.

Предлагается выполнить сжатие многомерных массивов информации о свойствах конструкционных материалов без потери

информативности методами факторного анализа [1].

Задача факторного анализа состоит в представлении значений характеристик материалов  $y_i$  в виде гипотетических факторов  $f_j$  значительного меньшего количества.

Наиболее простой моделью описания каждого параметра материала есть линейная модель вида:

$$y_j = a_{j1}f_1 + a_{j2}f_2 + \dots + a_{jn}f_n, j=1, 2, \dots, m, n < m,$$

где  $y_j$  –  $j$ -я характеристика конструкционного материала;  $a_{ji}$  – значение  $i$ -й факторной нагрузки  $j$ -й характеристики конструкционного материала.

Признаки, которые представляют свойства конструкционного материала, могут принимать как количественные, так и качественные значения. Их можно объединить в отдельные группы по совокупности близких значений признаков. Такое объединение материалов в группы (кластеры, таксоны) целесообразно выполнять методами кластерного анализа

Различные варианты разбивки объектов на  $k$  групп оцениваются по одному из критериев таксономии. Если признаки (свойства) объекта принимают количественные значения, то есть представляются в виде координат метрического пространства, то каждый объект со своими значениями будет отображаться в виде точки этого пространства. Два объекта с почти одинаковыми признаками отражаются в две близкие точки, а объекты, очень отличаются признаками, будут представлены далеко расположенными друг от друга точками. Таким образом, можно получить описание  $k$  групп, каждая из которых объединяет материал с близкими по значению признаками. В дальнейшем каждый новый конструкционный материал, можно автоматически отнести к той или иной группе [2].

С помощью методов дискриминантного анализа можно решать различные технологические задачи. Так, например, его можно использовать для определения рациональных условий и методов обработки новых конструкционных материалов методом заимствования. Все конструкционные материалы, используемые на предприятии,

группируются по химическому составу, физико-механическим свойствам, структуре и другим параметрам.

С помощью методов дискриминантного анализа исследуемый материал относится к одной из предложенных групп, а дальше в этой группе выбирается материал-аналог, который по совокупности своих свойств является близким к исследуемому. Условия и методы обработки материала-аналога будут исходными для исследуемого материала, которые в дальнейшем уточняются путем проведения кратковременных экспериментов. Кроме того, предложенную методику определения условий и методов обработки новых конструкционных материалов можно использовать для решения задачи другого типа, когда нужно в условиях реального производства заменить один материал на другой, очень похожий по совокупности свойств [3].

Задачу классификации конструкционных материалов также можно решить на основе использования искусственных нейронных сетей [3].

Приведенные методы многомерного статистического анализа составили ядро созданной системы автоматизированной обработки технологической информации [4].

Разработано алгоритмы и программы, которые реализуют разные методы обработки информации, они позволяют выполнять соответствующие вычисления как самостоятельно, так и в составе автоматизированной системы.

Данная система состоит из двух основных блоков:

- блок управления исходной информацией;
- функциональный блок.

Блок управления исходными данными состоит из программ создания базы данных в виде таблиц, их редактирования информации в базе и удаления из базы.

Функциональный блок включает программы факторного, кластерного и дискриминантного анализа, создания искусственных нейронных сетей, математического моделирования и прогнозирования

Программа кластерного анализа в свою очередь состоит из подпрограмм иерархической классификации и классификации по алгоритму « $k$  – средних».

Факторный анализ реализован с помощью подпрограмм сжатия информации, которые используют методы главных факторов и максимального правдоподобия.

Искусственные нейронные сети, используемые для решения задач классификации представлены в виде сетей прямого распространения с алгоритмом обучения – вероятностной искусственной нейронной сети.

Применение методов сжатия информации, классификации и распознавания образов позволяет значительно упростить ряд задач технологической подготовки производства за счет уменьшения признакового пространства, сокращение объемов обрабатываемой информации, группировка объектов по совокупности конструктивно-технологических признаков и поиска аналогов, сократить время решения различных технологических задач, а также повысить качество получаемых решений [5].

Установлено, что повышение эффективности решения задач технологической подготовки производства можно достичь целенаправленной обработкой технологической информации путем применения методов многомерного статистического анализа и современных методов моделирования и прогнозирования.

#### Литература

1. Вислоух С.П. Дослідження взаємозалежності ознак і зниження розмірностей інформаційних масивів в задачах технологічної підготовки виробництва. / Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ „ХП”. – Харків, 2007. – Вип.2 (15). – С. 55–63
2. Вислоух С.П. Применение методов кластерного анализа при проектировании технологических процессов. //Вестник Сев. ГТУ. Выпуск 36: Автоматизация процессов и управление. Сб. научн. трудов Севастоп. нац. техн. ун-т. -Севастополь, 2002. – С. 103-108.
3. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: моногр. / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 488 с.
4. Vysloukh S.P., Voloshko O.V., Rogovoy A.N. System of processing of technological information. Сб. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні. // Вісник національного університету «Львівська політехніка», 2014. – № 786. – С. 79-86.
5. Вислоух С.П., Барандич К.С., Волошко О.В. Методика визначення раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів. //Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування. – 2011. – Вип. 41. – С. 110–119.

УДК 539.3

**ПРИМЕНЕНИЕ РЯДОВ ФУРЬЕ В ЗАДАЧЕ О РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИНЫ С ТРЕЩИНОЙ**

**Гундина М.А.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Для описания механического поведения упругопластического материала для задачи о растяжении пластины, содержащей прямолинейную трещину, используются уравнения равновесия в напряжениях, записанные в полярной системе координат.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr,r} + (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})/r + \sigma_{r\varphi,\varphi}/r &= 0, \\ \sigma_{r\varphi,r} + 2\sigma_{r\varphi}/r + \sigma_{\varphi\varphi,\varphi}/r &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $r$  – безразмерный радиус,  $\sigma_{rr}, \sigma_{r\varphi}, \sigma_{\varphi\varphi}$  – физические проекции компонент тензора напряжений.

Для связи тензора деформации с компонентами вектора перемещений использовались соотношения Коши:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= u_{r,r}; \varepsilon_{\varphi\varphi} = u_{\varphi,\varphi}/r + u_r/r, \\ \varepsilon_{r\varphi} &= \frac{1}{2}(u_{\varphi,r} + u_{r,\varphi}/r - u_{\varphi}/r), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{r\varphi}, \varepsilon_{\varphi\varphi}$ , – физические проекции компонент тензора деформаций,  $u_r, u_{\varphi}$  – компоненты вектора перемещений.

Определяющие соотношения теории течения с упрочнением выражались следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta s_{rr} &= \delta e_{rr} - \delta \Phi(\Gamma)e_{rr}, \\ \delta s_{\varphi\varphi} &= \delta e_{\varphi\varphi} - \delta \Phi(\Gamma)e_{\varphi\varphi}, \\ \delta s_{r\varphi} &= \delta e_{r\varphi} - \delta \Phi(\Gamma)e_{r\varphi}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta s_{ij}, \delta e_{ij}, i, j = r, \varphi$  – приращения компонент девиаторов напряжений и деформаций,

$\Phi(\Gamma) = \sum_{k \geq 1} B_{2k} \Gamma^{2k}$  – функция интенсивности касательных деформаций,  $\Gamma$  – интенсивность деформаций,  $B_{2k}$  – постоянные материала.

Рассматривается случай плоской деформации.

Нагрузки на берегах прямолинейной трещины обращаются в нуль:

$$\sigma_{r\varphi}|_{\varphi=\pm\pi} = 0, \quad \sigma_{\varphi\varphi}|_{\varphi=\pm\pi} = 0. \quad (4)$$

Решение найдено в виде асимптотических разложений:

$$u_r(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} U_n(\varphi) r^{\lambda_n}, \quad u_{\varphi}(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} V_n(\varphi) r^{\lambda_n}. \quad (5)$$

Интенсивность деформаций имела вид

$$\Gamma = \frac{2}{3} \left( (\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr}\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2 + 3\varepsilon_{r\varphi}^2) \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{2}{3} (F(\varphi))^{\frac{1}{2}},$$

где  $F(\varphi) = \sum_{k \geq 0} \sum_{\ell \geq 0} a_{k\ell} r^{\lambda_k + \lambda_{\ell} - 2}$ .

Представление среднего напряжения  $\sigma$  описывается следующим образом

$$\sigma = \sum_{n \geq 0} W_n(\varphi) r^{\lambda_n - 1}, \quad (6)$$

где  $W_n(\varphi)$  – функции, подлежащие определению в процессе решения задачи.

Для произвольного приближения получаем краевую задачу о собственных значениях

$$\begin{aligned} \sum_{n \geq 0} \left( \frac{1}{2}(U_n'' + (\lambda_n - 1)V_n') + (\lambda_n - 1)(\lambda_n + 1)U_n - V_n' + \right. \\ \left. + (\lambda_n - 1)W_n \right) r^{\lambda_n - 2} - B \sum_{k \geq 0} \sum_{\ell \geq 0} \sum_{m \geq 0} (\mu_{k\ell m} - 3)\alpha_{k\ell m} + \\ \left. + (\alpha_{k\ell m} - \beta_{k\ell m}) + \frac{1}{2}\gamma'_{k\ell m} \right) r^{\mu_{k\ell m} - 4} = 0, \\ \sum_{n \geq 0} \left( V_n'' + \frac{1}{2}(\lambda_n + 5)U_n' + W_n' + \frac{1}{2}(\lambda_n - 1)(\lambda_n - 3) \right. \\ \left. \times V_n \right) r^{\lambda_n - 2} - B \sum_{k \geq 0} \sum_{\ell \geq 0} \sum_{m \geq 0} \left( \frac{1}{2}(\mu_{k\ell m} - 1)\gamma_{k\ell m} + \beta'_{k\ell m} \right. \\ \left. + \beta'_{k\ell m} \right) r^{\mu_{k\ell m} - 4} = 0, \sum_{n \geq 0} ((\lambda_n + 1)U_n + V_n') r^{\lambda_n - 1} = 0 \end{aligned}$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} \left( \sum_{n \geq 0} (U_n' + (\lambda_n - 1)V_n) r^{\lambda_n - 1} - \right. \\ \left. - B \sum_{k \geq 0} \sum_{\ell \geq 0} \sum_{m \geq 0} \gamma_{k\ell m} r^{\mu_{k\ell m} - 3} \right) \Big|_{\varphi=\pm\pi} = 0, \\ \left( \sum_{n \geq 0} (V_n' + U_n + W_n) r^{\lambda_n - 1} - \right. \\ \left. - B \sum_{k \geq 0} \sum_{\ell \geq 0} \sum_{m \geq 0} \beta_{k\ell m} r^{\mu_{k\ell m} - 3} \right) \Big|_{\varphi=\pm\pi} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

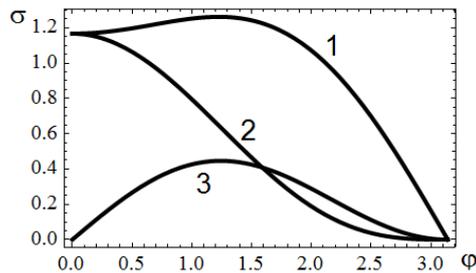
В общем случае условие разрешимости краевой задачи имеет вид

$$\lambda_n - 2 = \mu_{k\ell m} - 4 \quad (k + \ell + m = n + 1, n = 0, 1, 2, \dots).$$

На рисунке 1 представлены угловые распределения компонент напряжений, соотнесенных к пределу текучести, для стали с упругопластическими характеристиками:  $G = 7,9 \cdot 10^4$  МПа,  $B_2 = 3,212414 \cdot 10^{-6}$ ,  $\sigma_T = 400$  МПа при значении нагрузки  $P = 70$  МПа, при длине трещины в 20 мм, соотнесенной к ширине исходного образца с шириной в 200 мм в случае трещины нормального отрыва.

Величина поправки последующих приближений для  $\sigma_{rr}$  для трещины нормального отрыва нахо-

дится в диапазоне 1–4 % для первого приближения, а для второго этого интервал – 0,008–0,2 %, тогда как для  $\sigma_{r\varphi}$  значения для первого – 1–5,5 %; для второго – 0,03–0,8 %, для  $\sigma_{\varphi\varphi}$  от 1 % до 6 % для первого и от 0,02 до 0,5 % для второго.



1– $\sigma_{rr}$ ; 2– $\sigma_{\varphi\varphi}$ ; 3– $\sigma_{r\varphi}$

Рисунок 1 – Распределение компонент тензора напряжений на расстоянии  $r = 0,4$  мм от вершины трещины при изменении  $\varphi$  рад

В качестве 100% берется максимум функции, которая представляет собой сумму нулевого, первого и второго приближения. Учитывая, что максимум суммы трех функций, может не совпадать с суммой максимумов трех функций, процентный вклад рассматривается именно по отношению к норме функции суммы трех приближений.

Для нулевого приближения косинус-преобразование Фурье полученных функций  $U_0$ ,  $V_0$ ,  $W_0$  примут вид для  $\lambda_0 = 0,5$ :

$$U_0 = 0,003 - 0,001\cos(\varphi) - 0,003\cos(2\varphi) + 0,001\cos(3\varphi),$$

$$V_0 = -0,014 + 0,017\cos(\varphi) - 0,002\cos(2\varphi), \quad (15)$$

$$W_0 = 0,010 + 0,007\cos(\varphi) - 0,001\cos(2\varphi) + 0,001\cos(3\varphi).$$

Также получена оценка найденных значений компонент вектора перемещений и тензора напряжений в сравнении с результатами, полученными в рамках деформационной теории пластичности (рисунок 2).

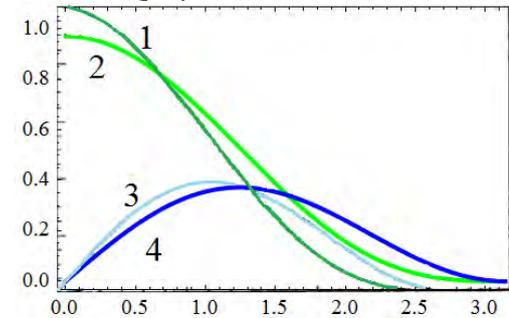


Рисунок 2. – Распределение безразмерных компонент тензора напряжений в рамках деформационной теории (1 –  $\sigma_{\varphi\varphi}$ ; 3 –  $\sigma_{r\varphi}$ ); в рамках теории течения (2 –  $\sigma_{r\varphi}$ ; 4 –  $\sigma_{r\varphi}$ )

Также как и для решения в рамках деформационной теории нормальное напряжение достигает своего наибольшего значения при  $\varphi = 0$ . Наибольшая концентрация напряжений наблюдается в окрестности вершины трещины. Характер монотонности компонент напряжений совпадает. График компоненты  $\sigma_{r\varphi}$  достигает наибольшего значения при  $90^\circ$ , как и в сравниваемых результатах. Обезразмеривание осуществляется следующим образом:

$$\hat{\sigma}_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j}}{\max(\sigma_{\varphi\varphi})}.$$

Отклонения между этими кривыми в первом и во втором случае не превышает 2 %.

УДК 519.682

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Нестеренко А.О., Выслоух С.П.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

В приборостроении весьма важным является подготовка и налаживание процесса изготовления необходимого продукта. Некачественное выполнение указанных работ приведет к значительным затратам финансовых ресурсов и времени, что является важным фактором, который может отрицательно повлиять в дальнейшем на судьбу всего производственного процесса [1].

На сегодняшний день актуальной является задача быстрого и качественного изготовления сложных приборов различного назначения и применения. Изготавливая изделия в сжатые сроки и приемлемой стоимостью, перед исполнителем

стоит задача сохранения уровня качества на указанном пределе и даже его повышения.

Современные технологии производства в приборостроении постоянно совершенствуются, что является движущей силой, которая дает возможность создавать новейшие изделия для решения множества ранее трудно решаемых и нерационально затратных сложных задач экономики и промышленности государства. Для решения данной задачи применяются различные методы улучшения технологии производства. Все они направлены на повышения качества и сокращения времени изготовления изделия.

Как сообщалось ранее, существует потребность ускорения сроков проектирования и изготовления изделий, в которых остро нуждается промышленность страны, оставляя при этом необходимый порог характеристик готового изделия. В данной ситуации важным является увеличение объемов производства этих изделий, уменьшение их себестоимости и повышения качества, что позволит успешно выполнить поставленные задачи.

Для решения указанных задач при разработке и производстве новых сложных изделий предлагается использовать методы имитационного моделирования, что является одним из эффективных способов создания технологических процессов в приборостроении.

Анализ современных средств имитационного моделирования показал, что для поставленных задач целесообразно применять многофункциональную среду имитационного моделирования AnyLogic, которая на порядок выше среди аналогов в данной сфере по своим показателям и имеет наиболее подходящие, не ограничивающие по сравнению с некоторыми аналогами, характеристики для применения в создании и наладке технологических процессов.

Использование AnyLogic дает возможность оценить эффект конструкторских решений в сложных системах реального мира [2].

Профессиональный инструмент имитационного моделирования AnyLogic нового поколения, который разработан на основе современных концепций в области информационных технологий и результатов исследований в теории гибридных систем и объектно-ориентированного моделирования. Построенная на их основе инструментальная система AnyLogic не ограничивает пользователя одной единственной парадигмой моделирования, что характерно для существующих на рынке инструментов моделирования. В AnyLogic разработчик может использовать разные уровни абстрагирования и разные стили и концепции, а также смешивать их при создании одной и той же модели. Программный продукт AnyLogic основан на объектно-ориентированные концепции. Объектно-ориентированный подход к представлению сложных систем является лучшим на сегодняшний день методом управления сложностью информации, эта концепция позволяет простым и естественным образом организовать и представить структуру сложной системы.

Таким образом, идеи и методы, направленные на управление сложностью, произведенные в последние десятилетия в области создания программных систем, позволяют разработчикам моделей в среде AnyLogic организовать мышление, структурировать разработку и в

конечном счете упростить и ускорить создание моделей.

AnyLogic не ограничивает пользователя одной-единственной парадигмой моделирования, что является характерным фактически для всех инструментов моделирования, существующих сегодня на рынке. В AnyLogic разработчик может гибко использовать различные уровни абстрагирования, различные стили и концепции, строить модели в рамках той или иной парадигмы и смешивать их при создании одной и той же модели, использовать ранее разработанные модули [2].

С помощью данной системы есть возможность построить модели участков изготовления деталей и линий сборки сложных изделий путем имитации всех элементов технологических процессов еще до начала запуска их реального производства.

Преимуществами программного средства AnyLogic является то, что эта среда моделирования поддерживает проектирование, разработку и документирование модели, позволяет выполнить компьютерные эксперименты с моделью, включая различные виды анализа – от анализа чувствительности параметров модели к их оптимизации по выбранному критерию. [3]

После создания имитационной модели участка изготовления и сборки изделия начинается фаза проектирования, связана с проведением экспериментов над исследуемым изделием. Учитывая тип изделия, его область применения, характеристики при которых будет применяться готовый продукт, а также включая во внимания все указания заказчика, производится эксперимент по изготовлению указанного продукта от начала до конечного его завершения.

Таким образом, есть возможность тестирования многих параметров производственного процесса с целью определения оптимальных решений. При этом программа AnyLogic использует все выходные данные (значения параметров, конфигурации планирование и т.д.) и имитирует работу участка изготовления деталей и сборки изделия в реальном масштабе времени. Мало того, имитационная модель является гибкой и может подвергаться изменению, внедрением различных характеристик или изменения технологического процесса без потери ранее наработанной модели.

К примеру, рассмотрим процесс планирования и оптимизации автоматизированного производства прибора. Для решения данной задачи необходимо определить лучшую конфигурацию производственного процесса и конфигурацию автоматизированной производственной линии для минимизации затрат и максимизации пропускной способности и надежности работы.

Для этого необходимо:

– определить типы и количество оборудования;

- оценить альтернативные варианты планировки производства;
- исследовать узкие места в перемещении материальных потоков;
- оценить влияние поведения операторов на показатели производства;
- определить поведение системы в случае поломок оборудования;
- определить вероятность производства бракованной продукции;
- определить, как изменятся показатели производства из-за плановых остановок.

Используя возможности среды AnyLogic можно дополнительно создать библиотеку, которая позволяет включать элементы для быстрого моделирования подобных систем и объектов, систем движения материальных потоков, работу персонала и систем контроля качества продукции.

После построения модели выполняется фаза проекта, связанная с проведением экспериментов, и процесс тестирования множества параметров для поиска оптимального решения. Далее, используя результаты проведенных экспериментов, определялись лучшие типы устройств производственной линии в целом и их конфигурации с точки зрения пропускной способности, количества брака и надежности. Таким образом, получены решения, которые позволили значительно улучшить устройство производственной линии и при минимальных затратах выбрать ее наилучшую конфигурацию.

УДК 004.056:061.68

## ФОРМИРОВАНИЕ СКРЕМБЛИРОВАННОГО ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА ДЛЯ МАСКИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Бокуть Л.В.<sup>1</sup>, Деев Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аналоговое скремблирование относится к классу известных методов маскирования связи и применяется практически во всех современных средствах передачи информации. Суть его состоит в преобразовании исходного речевого сигнала с целью минимизации признаков речевого сообщения, в результате которого этот сигнал становится неразборчивым и неузнаваемым. Необходимым условием такого преобразования является возможность обратного преобразования для восстановления речевого сигнала на приемной стороне [1].

Технические средства, разработанные на основе аналоговых методов скремблирования, часто используются для защиты речевой информации от прослушивания. При аналоговом скремблировании речевого сигнала можно преобразовывать по амплитуде, частоте и времени. Амплитудные преобразования при

Результатом имитационного моделирования и проведения экспериментов с применением полученной модели является повышение эффективности использования оборудования, оптимизация производства, сокращение времени производственного цикла, увеличение объемов производства и улучшение качества готового изделия. Это соответствует всем поставленным в данной работе задачам.

### Литература

1. Нестеренко А.О., Вислоух С.П. Оптимізація процесів приладобудівного виробництва шляхом імітаційного моделювання [Текст] / Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали тез доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 24–27 квіт. 2017 р.): у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – Т. 2. – С. 143.
2. Маликов, Р.Ф. Практикум по имитационному моделюванню складних систем в середі AnyLogic 6 [Текст]: учеб. пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. – 296с.
3. Боев В.Д., Кирик Д.И., Сыпченко Р.П. Компьютерное моделирование: Пособие для курсового и дипломного проектирования. — СПб.: ВАС, 2011. — 348 с.

скремблировании не применяются из-за проблем точного восстановления амплитуды речевого сигнала при его обработке.

При частотном преобразовании сигнала используются частотная инверсия сигнала, разбиение полосы частот речевого сигнала на несколько сегментов и частотная инверсия спектра в каждом сегменте относительно его средней частоты, разбиение частоты речевого сигнала на несколько сегментов и их частотные перестановки.

При временных преобразованиях производится разбиение сигнала на речевые сегменты и их перестановка во времени: инверсия по времени сегментов речи, временные перестановки сегментов речевого сигнала. При комбинированных методах преобразования сигнала используют одновременно несколько различных способов скремблирования (как частотных, так и временных), число которых

ограничивается, как правило, возможностями технической реализации аналоговых скремблеров.

Различие скремблеров состоит в числе частот инверсии, скорости их изменения и количестве ключей, определяющих длительность перебора возможных комбинаций изменяемых параметров без их повторения. Некоторое представление об уровне защиты информации может дать показатель количества ключевых параметров. Для частотного инвертора ключевым параметром является значение частоты инверсии сигнала. Размерность этого параметра, то есть число возможных значений частот инверсии (число ключей) с ощутимыми искажениями, возникающими при прослушивании на соседней частоте, не превышает 20–30.

При аналоговом скремблировании преобразованный речевой сигнал, обладая свойствами неразборчивости и неузнаваемости, занимает такую же полосу частот спектра, как и исходный сигнал. Присутствие при передаче в канале связи фрагментов исходного речевого сообщения, преобразованного в частотной (или) временной областях, означает, что возможен перехват и анализ передаваемой информации на уровне звуковых сигналов. Перехват сообщений возможен при применении специальных средств, позволяющих сначала определить ключевую последовательность (т. е. правила изменения параметров преобразования сигнала), а затем подстроиться под найденную ключевую последовательность [2].

Несмотря на высокое качество и разборчивость восстанавливаемой речи, аналоговые скремблеры обеспечивают в основном лишь низкий или средний, по сравнению с цифровыми системами, уровень защиты информации, однако их практическая реализация проще и дешевле.

При цифровом скремблировании предполагается дискретизация исходного аналогового сигнала и передача его основных компонент путем преобразования их в цифровой поток данных. Этот поток смешивается с некоторой псевдослучайной последовательностью, вырабатываемой ключевым генератором по одному из криптографических алгоритмов. Полученное таким образом сообщение с помощью модема передается в канал связи, на приемной стороне производятся обратные преобразования с целью получения открытого речевого сигнала. Реализация цифрового скремблирования на практике оказывается довольно сложной и дорогостоящей.

Предлагается метод маскирования информации, основанный на формировании и обработке скремблированного частотно-модулированного сигнала, произведением двоичных последовательностей, одна из которых псевдослучайная с известным законом формирования, другая – случайная, формируемая с

помощью источника физического шума и компаратора.

В качестве аппаратных реализаций скремблирования часто используют генератор случайных чисел на сдвиговом регистре с линейной обратной связью. Такая технология маскирования информации является достаточно эффективной. Показателем эффективности здесь служит количество операций, затрачиваемых на вычисление очередного элемента псевдослучайной последовательности. Однако, остается вероятность несанкционированного доступа к информации при применении специальных средств определения ключевой последовательности и подстройки под найденную ключевую последовательность.

Предлагаемое формирование скремблированного частотно-модулированного сигнала, содержащего речевое сообщение произведением двоичных последовательностей, обеспечивает высокую энергетическую скрытность. Во-первых, сформированный частотно-модулированный сигнал не имеет пороговых ограничений по помехоустойчивости и позволяет работать «под шумами», а во-вторых, спектр сигнала в канале не имеет характерных ярко выраженных участков. Добавление случайной компоненты позволяет избежать регулярности спектральных составляющих и тем самым увеличивает число ключевых комбинаций до бесконечности.

На передающей стороне сигнал формируется в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.

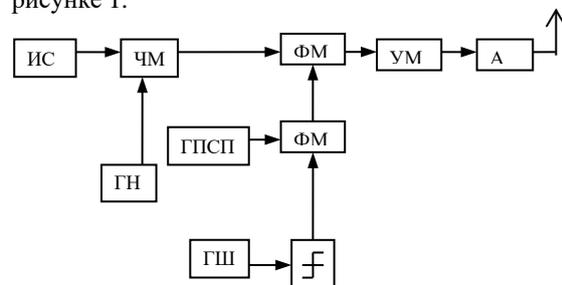


Рисунок 1 – Структурная схема формирования скремблированного сигнала

Источником речевого сообщения (ИС) аналогового сигнала  $\lambda(t)$  формирует низкочастотный сигнал. Генератор несущей частоты (ГН) обеспечивает формирование высокочастотного узкополосного несущего сигнала. В частотном модуляторе (ЧМ) аналоговый сигнал и несущий перемножаются. Сформированный узкополосный частотно-модулированный сигнал поступает на вход фазового манипулятора (ФМ<sub>1</sub>) и подвергается фазовой манипуляции двоичной последовательностью, представляющей комбинацию псевдослучайной двоичной последовательности (ПСП)  $g(t - \tau) = \{\pm 1\}$  и случайной двоичной последовательности  $X(t) = \{\pm 1\}$ , где  $\tau$  – случайная задержка.

Псевдослучайная двоичная последовательность  $g(t - \tau)$  вырабатывается в генераторе (ГПСП). Одновременно с псевдослучайной последовательностью, сгенерированной генератором, подаётся на фазовый манипулятор (ФМн<sub>2</sub>) случайная последовательность  $X(t)$ , вырабатываемая в генераторе (ГШ) и преобразованная в компараторе в клиппированный шум. На фазовом манипуляторе (ФМн<sub>2</sub>) осуществляется операция перемножения  $g(t - \tau)$  и  $X(t)$  и образуется двоичная скремблирующая последовательность:

$$Y(t - \tau) = g(t - \tau) \cdot X(t), \quad (1)$$

где полоса спектра последовательности  $X(t)$  определяется тактовой частотой  $f_T = 1/\tau_0$ , а также формирующим фильтром, включенным в ГШ и меньше полосы спектра ПСП,  $\tau_0$  – длительность элемента ПСП.

Сформированный скремблированный частотно-модулированный сигнал, полученный в результате перемножения в (ФМн<sub>1</sub>), усиливается в усилителе мощности (УМ), подаётся в на модуль

антенно-фидерного устройства (АФУ) и далее в эфир.

Скремблированный частотно-модулированный сигнал можно представить:

$$S(t) = a_0 Y(t - \tau) \cdot \cos[(\omega_0 t + \Psi(t) + \beta)], \quad (2)$$

где  $a_0$  и  $\omega_0$  – известные амплитуда и частота сигнала;

$Y(t) = g(t - \tau) \cdot X(t) = \{\pm 1\}$  – скремблирующая последовательность;

$\beta$  – случайная начальная фаза, равномерно распределенная в интервале  $[0, 2\pi]$ ;

$\Psi(t)$  – частота сигнала, медленно изменяющаяся в соответствии с передаваемым сообщением  $\lambda(t)$ , где  $\lambda(t) = d\Psi(t)/dt$ .

Литература

1. Хорошко В.А., Чекатков А.А. Методы и средства защиты информации. – М.: Юниор, 2010. – 501 с.
2. Чердынцев В.А., Деев Н.А. Подавление комплекса помех в каналах связи / В.А. Чердынцев, Н.А. Деев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 2. – С. 31–36.

УДК 380.001+530.182

## ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ СОЛИТОНА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

Князев М.А., Русакевич Д.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Проблема изучения квантовых солитонных состояний, соответствующих одиночным электронам, является весьма перспективной с точки зрения задач нанoeлектроники [1]. Такие состояния могут быть описаны при помощи решений уравнения Шредингера, учитывающего нелинейное взаимодействие электрона, находящегося у поверхности металла, с мнимыми зарядами, расположенными внутри металла. Модели с мнимыми зарядами широко применяются при изучении квантовых точек. В настоящей работе с использованием подхода, развитого в работе [2], получено приближенное выражение для энергии рассматриваемого солитонного состояния.

Известно, что кулоновское отталкивание электронов не позволяет формировать солитонные состояния. Однако для одного электрона такое отталкивание отсутствует, что позволяет построить самосогласованное решение так, чтобы исключить взаимодействие электрона с его собственным полем. Это можно сделать путем введения потенциала мнимого заряда, предполагая, что такой заряд вблизи поверхности металла (электрода) распределяется в соответствии с распределением плотности заряда электрона  $e^2 |\Psi(\vec{r}, t)|^2$ , где  $e$  – заряд электрона. Тогда соответствующее уравнение Шредингера имеет вид

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \Delta \Psi(\vec{r}, t) + V_c(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где потенциальная энергия взаимодействия электрона с мнимыми зарядами (интегрирование ведется по координатам всех мнимых зарядов) определяется соотношением

$$V_c(\vec{r}, t) = -\frac{e^2}{2\kappa} \int \frac{|\Psi(\vec{r}', t)|^2}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}', \quad (2)$$

$|\vec{r} - \vec{r}'|$  – расстояние от мнимого заряда до точки наблюдения,  $d$  – расстояние от заряда (действительного или мнимого) до поверхности электрода,  $\kappa$  – диэлектрическая проницаемость,  $m^*$  – эффективная масса электрона,  $a$  – размер солитона.

Построение точного решения уравнения (1) является очень сложной задачей. Однако, можно найти приближенное решение уравнения (1). В этом случае удастся достаточно просто получить приближенную оценку энергии состояния в зависимости от размера солитона, используя соотношение

$$E(a) = \frac{\hbar^2}{2m} \int |\nabla \Psi(\vec{r}, a)|^2 d\vec{r} + \int |\Psi(\vec{r}, a)|^2 V_c(\vec{r}, t) d\vec{r}. \quad (3)$$

С целью упрощения вычислений рассмотрим задачу в случае одной пространственной переменной. Для электронов, локализованных в квантовом проводе, потенциальная энергия взаимодействия  $V_c(x, t)$  приближенно может быть представлена в виде

$$V_c(x, t) \approx -\frac{e^2}{\kappa} |\Psi(x, t)|^2 \ln\left(\frac{a}{d}\right). \quad (4)$$

Если в соотношении (4) опустить множитель, содержащий логарифм, и подставить полученное выражение для  $V_c(x, t)$  в уравнение (1), то последнее можно привести к виду нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [3]

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} - \frac{e^2}{\kappa} |\Psi|^2 \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (5)$$

Солитонное решение нелинейного уравнения (5), описывающее локализованное в пространстве состояние, известно [4]. Оно имеет вид

$$\Psi(x, t) = \frac{\sqrt{2\alpha/v} \exp[i(kx - Et/\hbar)]}{\cosh[\sqrt{\alpha}(x - \hbar kt/m^*)]} \quad (6)$$

где  $\alpha = k^2 - 2m^*E/\hbar^2$ ,  $v = 2m^*e^2/\kappa\hbar^2$ . Нормировка волновой функции  $\Psi(x, t)$  позволяет записать соотношение  $a = 1/\sqrt{\alpha}$  и тем самым установить связь между размером солитона, описывающего заряд, с параметрами электрона.

Чтобы оценить кинетическую энергию солитонного состояния, подставим соотношение (6) в первое слагаемое в правой части соотношения (3). Вычисления носят достаточно громоздкий характер, но в результате интеграл удается свести к двум табличным интегралам [5]:

$$E_K = \frac{\hbar^2}{2m} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{d}{dx} \Psi(x, a, t) \right|^2 dx = \\ = \frac{\hbar^2}{2m} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2}{va^2 \cosh^4\left(\frac{x}{a} - \frac{\hbar kt}{a}\right)} \left[ \frac{1}{a^2} \sinh^2\left(\frac{x}{a} - \frac{\hbar kt}{a}\right) + \right. \\ \left. + k^2 \cosh^2\left(\frac{x}{a} - \frac{\hbar kt}{a}\right) \right] dx = \frac{2\hbar^2(a^2k^2 + 1)}{m^*va^3} - \frac{4\hbar^2}{3m^*va^3} = \\ = \frac{6\hbar^2(a^2k^2 + 2)}{3m^*va^3}. \quad (7)$$

Вычисление потенциальной энергии состояния осуществляется аналогичным образом, для чего необходимо подставить во второй член в правой части соотношения (3) выражения (4) и (6). Интеграл также удается свести к табличному. В результате получаем выражение вида

$$E_{II} = \int |\Psi(x, a, t)|^2 V_c(x, t) dx = \\ = \frac{4e^2}{a^4 v^2 \kappa} \ln \frac{a}{d} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{\cosh^4\left(\frac{x}{a} - \frac{\hbar kt}{a}\right)} = -\frac{16e^2}{3a^3 v^2 \kappa} \ln \frac{a}{d}. \quad (8)$$

Решение (6) уравнения (5) является точным. В тоже время, чтобы получить уравнение (5) из уравнения (1) в работе [2] было сделано предположение о том, что множитель  $\ln(a/d)$ , входящий в соотношение (4), является несущественным, т.е. по порядку величины сравним с единицей. На этом основании данный множитель был отброшен также и при вычислении приближенного значения энергии солитонного состояния. Однако указанные допущения позволяют рассматривать соотношение (6) как приближенное решение уравнения (1). Это означает, что, если учесть указанный логарифмический множитель при вычислении энергии, то точность полученного значения энергии должна быть выше по сравнению с точностью результата, полученного без учета этого множителя.

Известно, что потенциальная энергия электростатического взаимодействия в принципе зависит от размера солитона следующим образом:  $E_{II} \sim 1/a^2$  [6]. В тоже время, как видно из соотношения (8), в данной работе получена зависимость вида  $\ln(a/d)/a^3$ . Однако данный результат не противоречит известному и может быть корректно объяснен следующим образом. Уравнение (5) является нелинейным относительно неизвестной функции, в то время как уравнение Шредингера (1) является линейным. Если же представить логарифмический множитель  $\ln(a/d)$  в виде ряда Тейлора и ограничиться только первым членом разложения (т.е. рассмотреть линейное приближение), то в ведущем порядке разложения зависимость энергии взаимодействия от размера солитона принимает вид  $1/a^2$ .

Можно заключить, что оценка энергии, соответствующей решению в виде солитонного состояния, описывающего одиночный электрон вблизи поверхности металла, реализованная в работе [2], имеет меньшую область применимости, чем полученная в данной работе.

Данный вывод имеет и прямое отношение к оценке размера солитона  $a$  в сравнении с расстоянием до электрода  $d$ . Если положить, как это сделано в работе [2], что  $\ln(a/d) \sim 1$ , то тогда получаем  $a \sim ed$ , где  $e$  – основание натурального логарифма. Таким образом, получается, что размер солитона в 2–3 раза больше, чем расстояние до электрода. Этот результат согласуется с полученным в вышеупомянутой работе утверждением о том, что размер солитона должен превышать расстояние до электрода. Однако, такая оценка размера солитона является достаточно грубой. Если не требовать выполнения вышеуказанного ограничения на  $\ln(a/d)$ , то можно, применить различные разложения для функции логарифма в ряды. Это в принципе позволяет, во-первых, находить размер солитона в тех диапазонах значений аргумента  $a/d$ , при которых допустимо то или иное такое разложение, а во-вторых, определять размер с требуемой точностью. В последнем случае будет достаточно учесть необходимое количество членов ряда более высоких порядков. В тоже время, поскольку рассматриваемые вычисления носят приближенный характер, очень высокая точность определения размера солитона не может быть получена, так как в некоторый момент точность используемого приближения окажется ниже точности разложения в ряд.

#### Литература

1. Ткалич, В.Л. Физические основы наноэлектроники / В.Л. Ткалич, А.В. Макеева, Е.Е. Оборина – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 83 с.
2. Vyurkov, V. Quantum single electron soliton near metal surface / V. Vyurkov, D. Svintsov //

http://xxx.lanl.gov (arXiv.org/cond-mat. mes-hall / 1308.3460).

3. Додд, Р. Солитоны и нелинейные волновые уравнения / Р. Додд, Дж. Эйлбек, Дж. Гиббон, Х. Моррис – М.: Мир, 1988. – 694 с.

4. Zakharov, V.E. Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media / Zakharov V.E.,

Shabat A.B. // Sov. Phys. JETP – 1972. – V. 34, № 1. – P. 62-69.

5. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт – М.: Наука, 1978. – 228 с.

6. Chiao, R.Y. Self-trapping of optical beams / R.Y. Chiao, E. Garmire and C.H. Townes // Phys. Rev. Letters – 1964. – V. 13, № 15. – P. 479-481.

УДК 530.182

## УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПОПРАВКИ ВТОРОГО ПОРЯДКА К ПЛОТНОСТИ КОНДЕНСАТА БОЗЕ–ЭЙНШТЕЙНА

Князев М.А., Блинкова Н.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Исследование конденсата Бозе–Эйнштейна (БЕС) находит широкое применение при решении задач в таких областях физики как атомная физика, физика магнитных явлений, оптика, физика конденсированных состояний [1–3]. Существенно нелинейный характер модели, применяемой для описания свойств данной формы материи, обуславливает появление в ней решений в виде локализованных состояний типа солитонов или солитоноподобных объектов. Для описания солитонов в БЕС применяется уравнение Гросс-Питаевского, которое допускает представление в виде уравнений гидродинамики [4]. Поскольку решение нелинейных уравнений в общем случае является сложной задачей, для получения аналитического решения применяют различные приближения. Так, в работе [5] для получения решений типа светлого солитона в квази-одномерном БЕС использована построенная в работе [6] система уравнений квантовой гидродинамики с учетом третьего порядка по радиусу взаимодействия. Эта система для атомов, находящихся во внешнем потенциале  $V_{ext}(\vec{r}, t)$  и взаимодействующих между собой с потенциалом  $U(r)$ , имеет вид

$$\partial_t n(\vec{r}, t) + \partial^\alpha (n(\vec{r}, t) v^\alpha(\vec{r}, t)) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} mn(\vec{r}, t) \partial_t v^\alpha(\vec{r}, t) + \frac{1}{2} mn(\vec{r}, t) \partial^\alpha v^2(\vec{r}, t) - \\ - \frac{\hbar^2}{4m} \partial^\alpha \Delta n(\vec{r}, t) + \frac{\hbar^2}{4m} \partial^\beta \left( \frac{\partial^\alpha n(\vec{r}, t) \partial^\beta n(\vec{r}, t)}{n(\vec{r}, t)} \right) - \\ - \Upsilon n(\vec{r}, t) \partial_\alpha n(\vec{r}, t) - \frac{1}{16} \Upsilon_2 \partial_\alpha \Delta n^2(\vec{r}, t) = \\ = -n(\vec{r}, t) \partial^\alpha V_{ext}(\vec{r}, t), \quad (2) \end{aligned}$$

где  $n(\vec{r}, t)$  – концентрация частиц,  $v^\alpha(\vec{r}, t)$  – полевая скорость,  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $m$  – масса частицы,  $\Upsilon = \frac{4\pi}{3} \int r^3 \frac{\partial U(r)}{\partial r} dr$ ,  $\Upsilon_2 = \frac{4\pi}{15} \int r^5 \frac{\partial U(r)}{\partial r} dr$ .

В работе [5] в (1+1)-мерном случае для системы уравнений (1)–(2) получено явное выражение для поправки  $n_1 = n_1(x, t)$  к величине равновесной

концентрации частиц БЕС  $n_0$ . Вычисления проведены на основе теории возмущений с использованием подхода, предложенного в работе [7].

В рамках данного подхода удобно ввести новые независимые переменные, используя следующие формулы:

$$\xi = \varepsilon^{1/2}(z - ut), \quad \tau = \varepsilon^{3/2}ut, \quad (3)$$

где  $u$  – фазовая скорость волны,  $\varepsilon$  – малый безразмерный параметр. Выражения для концентрации частиц и полевой скорости записываются в виде следующих разложений:

$$n = n_0 + \varepsilon n_1 + \varepsilon^2 n_2 + \dots, \quad (4)$$

$$v = \varepsilon v_1 + \varepsilon^2 v_2 + \dots. \quad (5)$$

Считается, что равновесная концентрация  $n_0$  является постоянной величиной.

Вследствие особенностей нелинейного характера задачи обычный прием теории возмущений, основанный на подстановке соотношений (4) и (5) в уравнения (1) и (2) и последующем приравнении друг другу выражений с одинаковыми степенями  $\varepsilon$ , не приводит к искомому результату. Если выписать уравнения первого порядка по  $\varepsilon$ , то удастся найти только связь между поправками  $n_1$  и  $v_1$ , которая имеет вид  $n_1 = n_0 v_1 / u$ . Для того, чтобы получить явное выражение для  $n_1$ , понадобятся также уравнения второго порядка по  $\varepsilon$ . Однако эти уравнения уже будут включать поправки  $n_2$  и  $v_2$ . Тем не менее, рассматриваемая задача такова, что из первого уравнения второго порядка можно выразить поправки второго порядка через поправки первого порядка, а затем подставить их во второе уравнение второго порядка. В результате получается уравнение, которое содержит только  $n_1$ . Это уравнение имеет вид уравнения Кортевега-де Фриза и его решение хорошо известно [8]. Имея выражение для  $n_1$ , можно найти поправку  $v_1$ .

Представляет интерес дальнейшее изучение поведения БЕС в гидродинамическом

приближении и, в частности, вычисление поправки второго порядка  $n_2$  к равновесной концентрации частиц. В настоящей работе представлено уравнение для поправки  $n_2$ , полученное тем же способом как было получено уравнение для поправки  $n_1$  в работе [5]. Для этой цели потребовались уравнения первого, второго и третьего порядков по  $\varepsilon$ , получающиеся из системы уравнений (1)-(2), а также явное выражение для  $n_1$ . Поправки  $n_3$  и  $v_3$ , также как и описанном выше случае, удастся выразить через  $n_2$  и  $v_2$  при помощи первого из двух уравнений третьего порядка по  $\varepsilon$ . Подставляя полученные соотношения во второе уравнение третьего порядка по  $\varepsilon$ , найдем новое уравнение, которое кроме известных коэффициентов и заданных параметров модели будет содержать только  $n_0, n_1, v_1$  и  $n_2$ .

Данное уравнение является достаточно сложным. Его можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\hbar^2}{4m} + \frac{Y_2 n_0}{8} \right) \partial_\xi^3 n_2 - (muv_1 - Yn_1) \partial_\xi n_2 - \\ & - (mu^2 - Yn_0) \partial_\tau n_2 - (mud_\xi v_1 - Y \partial_\xi n_1) n_2 = \\ & = min_1 v \partial_\xi v_1 - mv_1^2 \partial_\xi n_1 - muv_1 \partial_\tau n_1 - \\ & - mn_1 v_1 \partial_\xi v_1 - mi \partial_\tau (n_1 v_1) + mu^2 v \partial_\tau n_1 + \\ & + min_1 \partial_\tau v_1 - \frac{1}{8} Y_2 n_1 \partial_\xi^3 n_1, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } n_1 = \frac{3v}{p_1} \cdot \frac{1}{\cosh^2(\psi)}, \quad \psi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v}{q_1}} \eta,$$

$$p_1 = \frac{3}{2n_0}, \quad q_1 = \left( \frac{\hbar^2}{2m} + \frac{1}{8} n_0 Y_2 \right) / (2Yn_0),$$

$\eta = \xi - vt$ ,  $v$  – скорость распространения солитона слева направо. Выражение для  $n_1$  получено в работе [5] при выполнении следующих граничных условий:  $n_1 = 0$  и  $\partial_\eta^2 n_1 = 0$  при  $\eta \rightarrow \pm\infty$ .

Уравнение Кортевега–де Фриза, описывающее поведение функции  $n_1$ , хотя и является нелинейным уравнением третьего порядка, тем не менее, содержит только постоянные коэффициенты. Кроме того, уравнение Кортевега–де Фриза является однородным. Полученное же в настоящей работе уравнение (6) для поправки второго порядка  $n_2$  по малому безразмерному параметру  $\varepsilon$  к равновесной концентрации ВЕС  $n_0$  не только является нелинейным уравнением третьего порядка в частных производных. Оно является ещё и неоднородным. К тому же и коэффициенты, которые входят в это уравнение, сами являются функциями.

Построение в явном виде аналитического решения этого уравнения даже в частном случае уединенных волн типа солитонов представляется очень сложной задачей. Однако вывод о том, что такое решение уравнения (6) в принципе существует, можно сделать, базируясь на методе,

при помощи которого это уравнение получено. При его выводе не было сделано никаких дополнительных предположений, выходящих за рамки гидродинамического приближения.

Что же касается самого солитонного решения, то можно предположить, что для некоторых предельных случаев удастся упростить выражения для коэффициентов уравнения (6) или даже положить их равными некоторым константам. Однако при этом всегда становится возможной ситуация, когда такого рода дополнительные упрощения приведут к потере физического содержания в модели. В этой связи представляется только один возможный способ решения уравнения (6), а именно применение численных методов решения.

При таком подходе в качестве начального условия можно выбрать условие  $n_2 = 0$  при  $\tau = 0$ . Это будет означать, что внешний потенциал  $V_{ext}(\vec{r}, t)$  включается только в начальный момент времени. Что же касается граничных условий, то их можно выбрать в таком же виде, в каком они были выбраны при определении поправки  $n_1$ , то есть считать функцию  $n_2$  и её первую и вторую производные по  $\xi$  равными нулю при  $\xi \rightarrow \pm\infty$ . Эти условия фактически являются стандартными при построении частных решений типа солитонов [9].

#### Литература

1. Кадомцев, Б.Б. Конденсаты Бозе-Эйнштейна / Б.Б. Кадомцев, М.Б. Кадомцев // УФН – 1997. – Т. 167, № 6. – С. 649-664.
2. Питаевский, Л.П. Конденсация Бозе-Эйнштейна в магнитных ловушках / Л.И. Питаевский // УФН – 1998. – Т. 168, № 6. – С. 641-653.
3. Питаевский, Л.П. Конденсаты Бозе-Эйнштейна в поле лазерного излучения / Л.И. Питаевский // УФН – 2006. – Т. 176, № 4. – С. 345-364.
4. Dalfvo, F. Theory of Bose-Einstein condensation in trapped gases / F. Dalfvo, S. Giorgini, L.P. Pitaevski and S. Stringari // Rev. Modern Physics – 1999. – V. 71, № 3. – P. 463-512.
5. Andreev, P.A. Bright-like soliton solution in quasi-one-dimensional BEC in third order on interaction radius / P.A. Andreev, L.S. Kuzmenkov // <http://xxx.lanl.gov> (arXiv.org/cond-mat. quant-gas/1105.553).
6. Andreev, P.A. Problem with the single-particle description and the spectra of intrinsic modes of degenerate boson-fermion systems // P.A. Andreev, L.S. Kuzmenkov / Phys. Rev. A – 2008. – V. 78, № 5. – 053624.
7. Washimi, H. Propagation of ion-acoustic solitary waves of small amplitude // H. Washimi, T. Taniuti / Phys. Rev. Lett. – 1966. – V. 17, № 19. – P. 996-998.
8. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи / М. Абловиц, Х. Сигур. – М.: Мир, 1987. – 497 с.
9. Лэм, Дж. (мл.) Введение в теорию солитонов / Дж. Лэм (мл.). – М.: Мир, 1990. – 294 с.

## ИЗМЕРЕНИЕ НЕФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Романчак В.М.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В работе предлагается аксиоматическая модель измерения нефизической величины.

Измерить субъективную величину можно в шкале порядка. Например, очень просто получить субъективную оценку роста в порядковой шкале для группы учащихся. Недостатком такой шкалы является то, что арифметические операции над величинами, измеренными в порядковой шкале, недопустимы. У субъективных величин, которые существуют только в сознании людей, нет размеров, поэтому их измеряют только в шкале порядка. В работе мы рассматриваем размер субъективной величины, как интерпретацию результатов, полученных в порядковой шкале. Для этого мы вводим интуитивное понятие - последовательность одинаково отличающихся объектов. Например, последовательность учеников, рост которых “на вскидку”, отличается одинаково. Номер объекта в такой последовательности будем называть рейтингом. Для проверки рейтинговой модели можно рассмотреть субъективные величины, которые измеряют в психофизике. В психофизике существуют два различных подхода к измерению интенсивности ощущений путем построения психофизической функции - законы Фехнера и Стивенса [1]. В первом случае зависимость получается логарифмической, во втором случае степенной. данных

Законы Стивенса и Фехнера связывают физические и субъективные (нефизические) величины. Физической величиной может быть, например, громкость звука, измеряемая прибором, а субъективной – оцениваемое экспертом ощущение громкости звука.

**Аксиомы нефизического измерения.**

В метрологии числовому результату сравнения можно поставить в соответствие только два способа сравнения – разность и отношение значений величин.

Сформулируем аксиомы измерения нефизической величины. Пусть  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots$ , - конечная или счетная последовательность объектов, которые характеризуют значения величины  $X$ ,  $i$  – порядковый номер объекта.

- A1. Каждой паре объектов  $(\omega_i, \omega_j)$  можно поставить в соответствие действительное число  $R(i, j)$  - результат сравнения.
- A2. Основных способов численного сравнения два - это разность значений и логарифм отношения значений,  $R(i, j) = x_i - x_j$  или  $R(i, j) = \ln(x_i/x_j)$ , где  $x_i, x_j > 0$ .
- A3. Результат сравнения двух объектов  $R(i, j)$  не зависит от способа сравнения.

Первые два требования A1, A2 должны выполняться при измерении любых величин – физических и нефизических. Третий постулат является особенностью измерения только нефизических величин. Это связано с тем, что нематериальные свойства существуют только в сознании людей, для них нет размеров и, соответственно, нечего сравнивать. Анализируя методы измерений, метрологи пришли к выводу, что единственным способом измерения нефизической величины является оценка ее проявления по шкале порядка. С другой стороны, если использовать шкалу порядка, то непонятно каким образом можно получить значения нефизических величин, которые фактически используют психофизики. В данной работе предлагается математическая модель, которая позволяет перейти от шкалы порядка к значениям физической величины, уточнить психофизические законы. Для этого вначале введем понятие последовательности одинаково отличающихся объектов.

*Последовательность одинаково отличающихся объектов.*

Понятие равновероятных исходов является неопределяемым при оценке вероятностной меры и принимается на основании мнения эксперта. Например, при подбрасывании монеты эксперт может интуитивно считать, что стороны монеты достаточно симметричны и могут выпасть с одинаковой вероятностью. Классическое определение вероятности сводит вычисление вероятности к понятию одинаковых объектов, которое считается основным и не подлежит формальному определению. В нашем случае априорно определяемым понятием будет последовательность одинаково отличающихся объектов. Это означает, что эксперт может указать на множество объектов, которые одинаково отличаются друг от друга.

*Порядковое определение рейтинга.*

Пусть  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots$ , - конечная или счетная последовательность объектов, которые характеризует нефизическая величина  $X$ .

*Определение.* Если  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots$ , - последовательность одинаково отличающихся объектов, то результат сравнения является постоянной величиной,  $R(i, i+1) = C$ , где  $C = \text{const}$ . Номер  $i$  будем называть значением рейтинга.

Теперь, используя аксиомы A1, A2, A3 и Определение, можно показать, что основные психофизические законы, законы Фехнера и Стивенса, эквивалентны.

*Замечание.* Обычно считается, что законы Фехнера и Стивенса это два различных закона.

Поясним, почему так происходит, используя упрощенный числовой пример. Пусть мы сравниваем одинаково отличающиеся объекты, площадь шести кругов. Будем считать, что с точки зрения эксперта площадь первого круга равна единице, площадь второго больше в два раза, площадь третьего больше в четыре раза и так далее. Тогда получим следующую последовательность значений для площади круга:

$$1, 2, 2^2, 2^3, 2^4, 2^5. \quad (1)$$

Конечно, мы можем сравнивать не только рядом стоящие пары объектов.

Чтобы быть адекватным, эксперт должен бы ответить, что третий круг на два порядка больше первого ( $2^2$ ), а четвертый круг на три порядка ( $2^3$ ) больше первого.

На самом деле, когда Стивенс просил своих испытуемых сообщать во сколько раз одно

ощущение больше другого, то испытуемый делал то, что он может делать - оценивал величину объекта в порядковой шкале и сообщал отношение рейтингов объектов, а не размеров. Например, что второй круг в два раза больше первого, третий в три раза больше первого и так далее. В этом случае последовательность субъективных оценок площади

$$1, 2, 3, 4, 5, 6. \quad (2)$$

Оценки (1) – сроятся на основании рейтинга объектов, оценки (2) являются рейтингом объектов. Оценки (2) соответствуют закону Стивенса, оценки (1) – модели нефизического измерения величины.

Модель нефизического измерения можно использовать для характеристики вероятности, полезности или качества объектов.

УДК 530.182

## РЕШЕНИЯ ТИПА WOBBLING KINK И OSCILLATING KINK В ТЕОРИИ $\phi^4$

Князев М.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Значительный интерес к скалярной модели  $\phi^4$  обусловлен её широким использованием для описания нелинейных процессов и явлений во многих областях физики. В (1+1)-мерном случае плотность функции Лагранжа модели имеет вид

$$\mathcal{L}(x, t) = \frac{1}{2} (\dot{\phi})^2 - \frac{1}{2} (\phi')^2 - \frac{1}{4} \lambda \left( \phi^2 - \frac{m^2}{\lambda} \right)^2,$$

где  $m$  – масса поля,  $\lambda$  – постоянная связи; точка соответствует дифференцированию по времени, а штрих – по пространственной координате. Уравнение движения модели записывается в виде [1]

$$\ddot{\phi} - \phi'' = m^2 \phi - \lambda \phi^3. \quad (1)$$

Данное уравнение относится к классу неинтегрируемых существенно нелинейных уравнений в частных производных [2] и для него можно построить только одно топологически нетривиальное солитоноподобное решение. Оно называется одиночным кинком (антикинком) и имеет вид

$$\phi = \pm \frac{m}{\sqrt{\lambda}} \tanh \left[ \frac{m}{\sqrt{\lambda}} \left( \frac{x-x_0-ut}{\sqrt{1-u^2}} \right) \right], \quad (2)$$

где “+” соответствует кинку, а “-” – антикинку;  $x_0$  характеризует положение решения в начальный момент времени.

Наряду с точным решением (2) уравнение (1) допускает существование и ряда других приближенных решений. Особый интерес среди таких приближенных решений представляют решения, для которых характерна периодическая зависимость от времени. Наиболее известны из них это решения типа oscillating kink и wobbling kink. Несмотря на периодическую зависимость обоих решений от времени, характер этой зависимости позволяет различать их в принципе.

Важным свойством кинков (и вообще, любых солитонов или солитоноподобных объектов) считалась их способность сохранять форму в процессе взаимодействия. Численные эксперименты показывали, что единственное отличие между двумя кинками (антикинками, кинком и антикинком) в результате их столкновения заключается в появлении дополнительного сдвига фазы между такими решениями. Это позволяло надеяться на возможность использования этих решений для описания упругих столкновений элементарных частиц. Дальнейшие исследования, однако, привели к двум важным результатам.

Первый из них состоит в том, что не всегда кинки (и антикинки) не сохраняют форму в процессе взаимодействия. После взаимодействия они восстанавливают ту форму, которой обладали до взаимодействия. В самом процессе же взаимодействия их форма может изменяться, причем весьма существенно. Эти изменения, как правило, носят характер нерегулярных колебаний с переменными амплитудой и частотой, которые в дальнейшем, в соответствии с общепринятой практикой, мы будем называть осцилляциями. Характер этих осцилляций зависит не только от значений параметров модели, но и от того, какие механизмы взаимодействия в модели учитываются. В случае кинков подобного рода решения в англоязычной литературе называются oscillating kink.

К первым работам, в которых появляются колебательные процессы применительно к кинкам, можно отнести статьи [3, 4], посвященные возможности существования связанного состояния

кинк-антикинк. По аналогии с теорией  $\sin$ -Гордон такое состояние называется бризером. В работе [3] предпринята попытка численного решения уравнения (1), с целью построить решение, описывающее бризер в теории  $\phi^4$ . Было показано, что для уравнения (1) можно приближенно построить локализованное слабозатухающее решение, которое медленно осциллирует во времени. Это решение не является точным и для него не удалось получить замкнутое аналитическое выражение.

Похожая ситуация имеет место и в работе [4], в которой также рассматривается проблема связанных состояний кинков. Показано, что в установившемся режиме возникает квазисвязанное состояние двух кинков, которое характеризуется регулярными колебаниями. Найдено приближенное аналитическое выражение для этого состояния.

Осцилляции решений в обеих работах обусловлены процессами диссипации энергии при взаимодействии кинков. В настоящее время доказано, что бризер в теории  $\phi^4$  не существует [5]. Для уравнения (1) возможно только формальное асимптотическое представление для бризера в пределе малых амплитуд и частот. Силы взаимодействия между решениями, составляющими бризер, не только сложным образом зависят от положения этих составляющих, но и неустойчивы по отношению к расстоянию между ними. Вследствие постоянного излучения энергии бризер очень быстро распадается.

Однако, как следует из работы [6], уравнение (1) может иметь осциллирующие решения, и не только соответствующие связанным состояниям, если учесть дополнительные механизмы переноса энергии. Эти механизмы могут описывать как внутренние свойства системы, тогда их вклады можно учесть в выражении для потенциала, так и внешнее воздействие, тогда уравнение (1) будет неоднородным.

В указанных выше примерах колебания носили произвольный характер с широкими диапазонами изменений амплитуды и частоты.

Во-вторых, оказалось, что, если нелинейное уравнение имеет статическое решение в виде кинка (солитона или какого-либо солитоноподобного объекта), то для такого уравнения могут существовать решения особого типа, которые обладают дополнительной внутренней степенью свободы. Для таких решений среднее по времени значение удовлетворяет граничным условиям для обычных решений, но в тоже время само решение является периодической функцией координат и времени. Периодический характер такого решения также можно связать с тем, что профиль функции является осциллирующим. Однако, как следует из результатов вычислений, данные осцилляции носят особый характер. Их величина определяется параметром порядка системы, который значительно меньше её характерного размера.

Таким образом, эти осцилляции представляют собой нечто похожее на дрожание вещества в студенистом состоянии. Для таких кинков в англоязычной литературе принято название *wobbling kink*. Можно сказать, что по сравнению с обычным кинком *wobbling kink* обладает своего рода «тонкой» структурой.

Впервые проблема состояний нелинейной системы, для описания которых в настоящее время используются решения в виде колеблющегося кинка, была описана при экспериментальном исследовании пиннинга (зацепления дислокаций) в полиацетилене  $(\text{CH})_x$  [7].

Наиболее подробно теория решений типа *wobbling kink* разработана в работе [8]. Эту работу можно рассматривать как основополагающую в теории таких решений. В ней показано, что, если нелинейное уравнение в частных производных допускает точное решение в виде статического кинка, то оно также будет иметь, по крайней мере приближенное, решение в виде *wobbling kink*. Такое новое решение удовлетворяет граничным условиям для обычного кинка, но является периодической функцией времени. Это становится возможным благодаря дополнительной внутренней степени свободы состояния. Разработан формальный метод построения аналитических выражений для *wobbling kinks* в моделях  $\phi^4$  и *sine-Gordon* в виде степенных рядов. При этом анзац решения выбирается в таком виде, чтобы члены ряда сразу были бы равномерно ограниченными функциями по времени, а надо вычислить пространственные сомножители в таком виде, чтобы и они были равномерно ограниченными функциями, но уже по пространственной координате. Доказано, что такого рода ряды являются асимптотическими, если рассматривать достаточно большие промежутки времени. Основное предположение физического характера при данном подходе состоит в том, что *wobbling kink* представляется в виде суперпозиции линейных осцилляторов. Однако, как показывают дополнительные исследования, такое приближение носит ограниченный характер и пригодно только для нескольких первых членов ряда (в зависимости от модели). Если же попытаться вычислить члены более высоких порядков вышеупомянутого асимптотического ряда, то они перестают быть равномерно ограниченными и ряд расходится. Это связано с тем, что по сути дела колебания носят нелинейный характер и эта нелинейность становится существенной. Особенностью нелинейного осциллятора является зависимость амплитуды от частоты, и, если для первых членов ряда эта зависимость не столь значительна, то в дальнейших расчетах ею уже пренебрегать нельзя.

1. Раджараман, Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля / Р. Раджараман. – М.: Мир, 1985. – 416 с.

2. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи / М. Абловиц, Х. Сигур – М.: Мир, 1987. – 479 с.
3. Кудрявцев, А.Е. О солитоноподобных решениях для скалярного поля Хиггса / А.Е. Кудрявцев // Письма в ЖЭТФ – 1975. – Т. 22, вып. 3. – С. 178-181.
4. Гетманов, Б.С. Связанные состояния солитонов в моделях теории поля  $\phi^4$  / Б.С. Гетманов // Письма в ЖЭТФ – 1976. – Т. 24, вып. 5. – С. 323-327.
5. Segur, H. Nonexistence of small-amplitude breather solutions in  $\phi^4$  theory / H. Segur,

- M.D. Kruskal // Phys. Rev. Lett. – 1987 – V. 58, № 8. – P. 747-750.
6. Лидский, Б.В. Периодические решения уравнения  $u_{tt} - u_{xx} + u^3 = 0$  / Б.В. Лидский, Е.И. Шульман // Функциональный анализ и его приложения – 1988 – Т. 22, Вып. 4. – С. 88-89.
7. Rice, M.J. Charge  $\Pi$ -phase kinks in lightly doped polyacetylene / M.J. Rice // Phys. Lett. A. – 1979 – V. 71, № 1. – P. 152-154.
8. Segur, H. Wobbling kink in  $\phi^4$  and sine-Gordon theory / H. Segur // J. of Math. Physics – 1983. – V. 24, № 6. – P. 1439-1443.

УДК 512.624.95:378.147.091.3

**КРИПТОГРАФИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ КРИПТОСИСТЕМЫ РАБИНА****Крупенкова Т.Г.<sup>1</sup>, Липницкий В.А.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Криптосистема Рабина явилась результатом переосмысления криптосистемы RSA. Рабин М. заинтересовался вопросом выбора ключа  $e$  в криптосистеме RSA. Там  $e$  всегда взаимно просто с  $\phi(n)$  и, в частности, всегда нечётно. А что произойдёт, если взять чётным? Да, а если возьмём наипростейший случай  $e = 2$ ? В результате подробного рассмотрения неожиданно и появилась рассматриваемая здесь криптосистема Рабина.

Пусть  $p$  и  $q$  – два различных простых числа. Пусть  $N = pq$ . Зафиксируем число  $B$ ,  $0 \leq B < N$ . Пара  $\{N, B\}$  есть пара открытых ключей криптосистемы Рабина. Сообщение  $C$  рассматривается как элемент кольца  $Z/NZ$  и шифруется формулой:  $m = c(c + B) \pmod{N}$ . Ясно, что такой способ шифрования реализуется гораздо быстрее, чем в криптосистеме RSA.

Расшифровка здесь представляет гораздо более сложную процедуру даже для законного получателя криптотекста. Фактически, сообщение  $C$  есть один из корней квадратного уравнения  $x^2 + Bx - m = 0$  в кольце  $Z/NZ$ . В этом кольце 2, очевидно, является обратимым элементом. Поэтому для решения данного квадратного уравнения вполне пригодны стандартные формулы:  $x = \sqrt{\frac{B^2}{4} + m - \frac{B}{2}} \pmod{N}$ . Разумеется,

деление на 2 здесь реализуется умножением на  $2^{-1} \in Z/NZ^*$ . Сложность этих вычислений в том, что из каждого квадрата в данном кольце  $Z/NZ$  извлекаются 4 различных корня.

Другая проблема – как найти быстро квадратные корни из данного элемента кольца  $Z/NZ$  – в общем случае остаётся открытой. Существенно облегчает её решение знание делителей числа  $N$ . Тогда можно воспользоваться китайской теоремой об остатках и формулой Гарнера. Поэтому сложность взлома

криптосистемы Рабина такая же, как и криптосистемы RSA.

Если разложение  $n = p \cdot q$  в произведение простых множителей  $p$  и  $q$  известно, то легко находится CRT-представление дискриминанта:  $D \leftrightarrow (D_p, D_q)$ . Квадратный корень из  $D$  извлекается в  $Z/nZ$ , тогда и только тогда, когда  $D$  принадлежит подгруппе квадратов  $Z/nZ^{*2}$  в группе  $Z/nZ^*$ . А это возможно тогда и только тогда, когда  $D_p \in Z/pZ^{*2}$  и  $D_q \in Z/qZ^{*2}$ . Проверить это, а заодно и найти корни можно, в принципе, прямым перебором: вычисляем по модулю  $p$  последовательно  $2^2, 3^2$ , и так далее, пока не найдём эмпирически  $u \leq (p-1)$ , такое, что  $u^2 \pmod{p} \equiv D_p$ . Аналогично поступаем с  $D_q$ .

В трёх из четырёх случаев теория чисел даёт прямые формулы для квадратных корней из нечётных простых чисел, то есть решает проблему поиска квадратных корней.

Следует напомнить, что для всех простых  $p$  кольцо  $Z/pZ$  является полем. Классическая теория полиномов справедлива для всех полей. В частности, имеет место однозначность разложения всякого полинома в произведение неприводимых полиномов-множителей. Отсюда следует, что каждый полином степени  $n \geq 1$  с коэффициентами из  $Z/pZ$  имеет не более  $n$  корней. В частности, полином  $x^2 - \bar{1}$  имеет в точности два корня:  $\bar{1}$  и  $-\bar{1}$ .

Проблема поиска квадратных корней остаётся открытой для полей  $Z/pZ$  с нечётными простыми  $p \equiv 1 \pmod{8}$ . В этом случае прямых формул не существует, но есть вполне детерминированный процесс нахождения квадратных корней. Здесь  $p-1 = 2^e \cdot q$ , где  $e \geq 3$ ,  $q$  – нечётное число. Циклическая группа  $Z/pZ^*$  содержит единственную циклическую подгруппу  $G$  порядка  $2^e$ . Пусть  $f$  – квадратичный невычет по модулю  $p$  из множества

$\{1, 2, \dots, p-1\}$ . Тогда  $f^q \equiv g \pmod{p}$  для некоторого  $g \in \{1, 2, \dots, p-1\}$ . При этом  $g \in G$  и одновременно остаётся квадратичным невычетом. Отсюда следует, что  $g$  является примитивным элементом группы  $G$  (предположение о не примитивности сразу же приводит к заключению, что  $g$  – квадратичный вычет).

При  $p \equiv 1 \pmod{8}$  и  $2$  и  $-1$  являются квадратичными вычетами. Но с вероятностью  $1/2$  можно наудачу достаточно быстро найти в поле  $Z/pZ$  квадратичный невычет, то есть элемент  $f \in \{1, 2, \dots, p-1\}$ , удовлетворяющий соотношению  $f^{(p-1)/2} \equiv -1 \pmod{p}$ . После этого несложно найти образующую  $g$  подгруппы  $G$  по формуле:  $f^q \equiv g \pmod{p}$ .

Перед нами стоит задача нахождения квадратного корня из конкретного числа  $z \in \{1, 2, \dots, p-1\}$  в поле  $Z/pZ$  с нечётными простыми  $p \equiv 1 \pmod{8}$ . Конечно,  $\bar{z} \in Z/pZ^{*2}$ .

Иными словами,  $z^{(p-1)/2} = (z^q)^{2^{e-1}} \equiv 1 \pmod{p}$ .

Следовательно,  $(z^q) \pmod{p} = y$  принадлежит циклической группе  $G = \langle g \rangle$ , порождённой элементом  $g$ , и является квадратичным вычетом.

Поэтому  $y$  не является образующей группы  $G$ . Найдётся чётное число  $k$ ,  $0 \leq k \leq 2^e$ , такое, что

$\bar{g}^k = \bar{y}^{-1}$ . Тогда  $z^q \cdot g^k \equiv 1 \pmod{p}$ , а следовательно,  $z^{q+1} \cdot g^k \equiv z \pmod{p}$ . Очевидно,  $\bar{y}_1 = \bar{z}^{(q+1)/2} \cdot \bar{g}^{k/2}$  является квадратным корнем из  $\bar{z}$  в поле  $Z/pZ$ . Прямой переборный метод элементов  $Z/pZ$  и вычисления их квадратов до получения  $\bar{z}$  мы заменили двумя переборными процедурами – поиск квадратичного невычета  $f \in \{1, 2, \dots, p-1\}$  и поиск чётной степени  $k$  элемента  $\bar{g} = \bar{f}^q$ , равной  $\bar{y}^{-1}$ . Эти процедуры предполагаются быть достаточно короткими.

#### Литература

1. Венбо Мао. Современная криптография. Теория и практика: пер. с англ. – Издательство М.: Вильямс, 2005 – 768 с.
2. Липницкий В.А. Современная прикладная алгебра. Математические основы защиты информации от помех и несанкционированного доступа. – Мн.: БГУИР, 2006. – 88 с.
3. Крупенкова Т.Г. Криптографические средства защиты информации: в 2 ч. – Электрон. дан. БНТУ, 2012. – Ч.1: учебно-методическое пособие.

УДК 681.2.082:621.3

### ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА НА ГАЗОВУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДВУХСЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ

Реутская О.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В современной газовой сенсорике особое внимание уделяется вопросам повышения газовой чувствительности, снижения энергопотребления, упрощения технологий изготовления, уменьшения стоимости изделий без изменения газочувствительных качеств датчиков и систем.

В данной работе проведено исследование газочувствительных свойств двухсенсорной газовой микросистемы, описанной в работе [1] в различных режимах работы.

Режим постоянного нагрева заключается в подключении сенсоров микросистемы к источникам постоянного питания в выбранном режиме.

Экспериментально было установлено, что при использовании постоянного нагрева на сенсорах микросистемы наблюдается «дрейф» значений сопротивлений. Например, при токе 51 мА и мощности 83,4 мВт при постоянном нагреве в течение 8 ч изменение сопротивления на одном из сенсоров составило 0,89 кОм.

Для того, чтобы физико-химические процессы протекали на поверхности чувствительного слоя достаточно быстро, обеспечивая быстроедействие на уровне нескольких секунд, сенсор периодически необходимо разогревать до температуры

450 – 500°C [2]. В результате характеристики сенсора способны восстанавливаться до исходного состояния. В период отжига происходит активное освобождение поверхностных слоев полупроводника от сорбированных «отравляющих» газовых компонент [3].

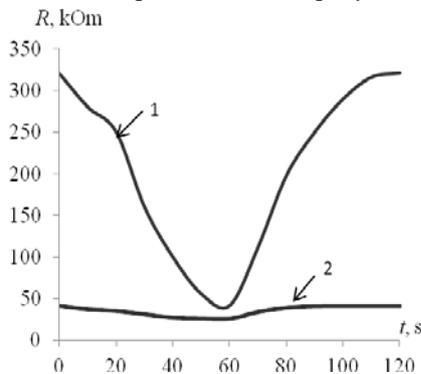
Целью данной работы являлось исследование эффективности режима импульсного нагрева для мультисенсорной микросистемы, состоящей из двух сенсоров на подложке из наноструктурированного оксида алюминия, по сравнению с режимом постоянного нагрева. Важной особенностью является сохранение параметров микросистемы в результате воздействия серии импульсных нагревов на конструкцию и газочувствительные слои, и обеспечение ее работоспособность на протяжении длительного периода времени.

В качестве чувствительных слоев были выбраны  $\text{SnO}_2 + \text{Pt} + \text{Pd}$  для первого сенсора микросистемы, и  $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$  – для второго. При формировании газочувствительных слоев применялась методика капельного послойного нанесения выбранных составов с промежуточными кратковременными отжигами. Подготовка к измерению газовой

чувствительности к воздействию газов CO и NO<sub>2</sub> включала отжиг сенсоров микросистемы при мощности 60 мВт в течении 320 ч. При проведении измерений сенсорного отклика было установлено взаимное влияние мощностей сенсоров микросистемы друг на друга. Учитывая данный факт, можно уменьшать мощность сенсоров при подборе режимов отжигов микросистемы в целом.

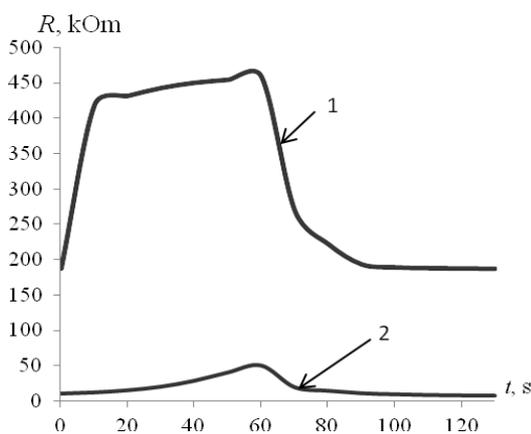
Измерения сенсорного отклика в режиме импульсного нагрева проводились следующим образом. Устанавливалась мощность на каждом сенсоре микросистемы 1,3 мВт, затем проводился кратковременный отжиг в течении 5 с при мощности 61 мВт, через 15 мин осуществлялась подача детектируемых газов CO или NO<sub>2</sub> с концентрацией 200 ppm и 4 ppm, соответственно, и фиксировались значения сопротивлений для каждого из сенсоров.

Результаты измерений сопротивления при воздействии CO представлены на рисунке 1.



- 1 – чувствительный слой SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd;  
2 – чувствительный слой In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt

Рисунок 1 - Зависимость сопротивления микросистемы от времени при воздействии CO с концентрацией 200 ppm



- 1 – чувствительный слой SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd;  
2 – чувствительный слой In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt

Рисунок 2 - Зависимость сопротивления микросистемы от времени при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm

Газочувствительный слой на основе оксида олова показал более высокие результаты чувствительности к воздействию CO, чем на основе оксидов алюминия и индия.

На рисунке 2 представлены зависимости сопротивления микросистемы от времени при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm при измерении в режиме импульсного нагрева.

Результаты измерения сопротивления микросистемы при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm показали высокую чувствительность выбранных слоев к газу. Что позволяет производить измерения, в том числе и для концентраций NO<sub>2</sub> более низких значений (1-2 ppm).

Режим импульсного нагрева позволил снизить время релаксации микросистемы до 45 с. В режиме постоянного нагрева это время составило около 5 мин.

Методика измерения сенсорного отклика микросистемы в режиме импульсного нагрева, обеспечивает возможность проводить кратковременный «отжиг» сенсора перед началом измерений концентраций газов при малых мощностях нагрева. Такой способ измерения позволяет получить более высокий сенсорный отклик и снизить потребляемую мощность системы в целом, по сравнению с режимом постоянного нагрева.

При длительных испытаниях микросистем кратковременные отжиги не показали нарушения долговременности использования сенсоров, что свидетельствует об их оптимальности при работе с газовыми полупроводниковыми сенсорами и системами. При подборе режима импульсного нагрева можно получить потребляемую мощность микросистемы, не превышающую 10 мВт, сохраняя при этом ее газочувствительные характеристики.

В результате проведенных исследований было установлено, что отношение значений сенсорного отклика в режимах импульсного и постоянного нагревов микросистемы увеличилась для сенсора с чувствительным слоем SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd в 1,7 и 1,5 раза, а с чувствительным слоем In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt – в 1,5 и 3,8 раза при воздействии CO и NO<sub>2</sub>, соответственно. При измерении сигнала сенсора в течении 60 с при импульсном нагреве, сенсорный отклик для сенсора SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd составил ~ 670 % для определения CO с концентрацией 200 ppm, а сенсора In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt ~ 380 % при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm. При этом средняя потребляемая мощность микросистемы не превышает 25 мВт.

Полученные в результате эксперимента данные подтвердили высокую работоспособности двухсенсорной микросистемы и возможность снижения энергопотребления полупроводниковых сенсоров и сенсорных микросистем до десятка милливатт.

Литература

1. Реутская, О.Г. Разработка 2-х сенсорной газовой микросистемы на подложках из пористого анодного оксида алюминия / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Приборостроение-2014: Материалы 7-й Международной научно-технической конференции, Минск, 19-21 ноября 2014 г. – Минск, 2014. – С. 362-364.

2. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors / S.R. Morrison // Sensor & Actuator. – 1997. – № 12. – P.425 – 440.

3. Румянцева, М.Н. Влияние микроструктуры полупроводниковых сенсорных материалов на хемосорбцию кислорода на их поверхности / М.Н. Румянцева Е. А. Макеева, А.М. Гаськов // журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева, 2008. – Т. LII, № 2. – С. 122–129.

УДК 544.22+544.08

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (Ag, Pd) НА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДА ВОЛЬФРАМА  $WO_3$  И КОМПОЗИЦИИ  $WO_3-Co_3O_4$**

**Савицкий А.А.<sup>1</sup>, Гайдук Ю.С.<sup>1</sup>, Реутская О.Г.<sup>2</sup>, Ломоносов В.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Композиции оксида вольфрама  $WO_3-Co_3O_4$ ,  $WO_3-In_2O_3$ ,  $WO_3-MUNT$  (многостенные углеродные нанотрубки), полученные золь-гель методом, зарекомендовали себя в качестве перспективных материалов для создания чувствительных мало-мощных полупроводниковых газовых сенсоров, способных, в зависимости от режима работы, к избирательному детектированию газов различной природы ( $NO_2$ ,  $CO$  и др.) [1, 2].

В данной работе исследовалось влияние добавок благородных металлов (Pd, Ag) на газочувствительные свойства оксида вольфрама ( $WO_3$ ) и композиции  $WO_3-Co_3O_4$ , содержащей 5 % мас.  $Co_3O_4$ .

**Методика эксперимента.** Оксид вольфрама и оксид кобальта получали из 1,23 М водного раствора вольфрамата натрия  $Na_2WO_3 \times 2H_2O$  путем капельного вливания в 12 М раствор азотной кислоты. Оксид кобальта  $Co_3O_4$  получали из 2,3 М водных растворов сульфата кобальта  $CoSO_4 \times 7H_2O$  путем добавления 9,24 М водного раствора аммиака и последующего удаления электролитов.

Добавки Pd и Ag вводились путём прибавления к соответствующим золям гидроксидов вольфрама и кобальта водных растворов  $PdCl_2$  или  $AgNO_3$ , из расчета 1,5 % мас. (в пересчете на металл) от сухого остатка оксида (220°C, 1 ч).

Электрическое сопротивление образцов (таблеток) оксида вольфрама и композиции оксида вольфрама с  $Co_3O_4$  и добавками 1,5 % Ag и Pd в интервале 100–250 °C измеряли двухзондовым методом в корундовой ячейке, помещенной в трубчатую печь, подключенную к терморегулятору. Образцы в виде таблеток (диаметр 10 мм, толщина 3,5 мм, масса 0,7 – 0,8 г) прессовались из предварительно отожженных на воздухе порошков оксидов (400 °C, 2 ч) с применением органического связующего (канифоль) на гидравлическом прессе (давление 150 кПа) и спекались на воздухе при 600 °C (2 ч). Для улучшения контакта на обе стороны образца наносилась серебряная паста.

Электрическое сопротивление в режиме нагрева и охлаждения измеряли при помощи цифрового ампервольтметра В7–40, температура контролировалась при помощи хромель-алюмелевой термопары, закрепленной непосредственно вблизи образца.

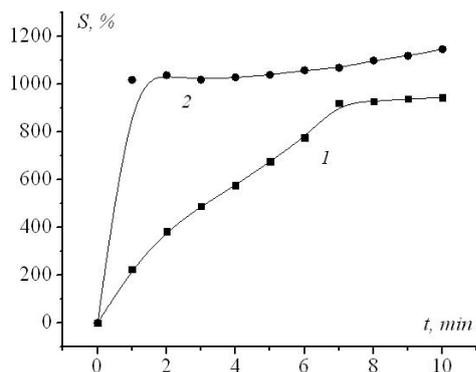
Газочувствительный отклик (S, %) определяли по формуле  $S = (R_g - R_a) / R_a \cdot 100 \%$ , для газовой смеси, содержащей диоксид азота, и по формуле  $S = (R_a - R_g) / R_g \cdot 100 \%$ , для газовой смеси, содержащей оксид углерода ( $CO$ ), где  $R_a$  и  $R_g$  – сопротивление слоя на воздухе и при воздействии газовой смеси, соответственно. Газовоздушная смесь пропусклась через термостатированную измерительную ячейку в течение 10 минут со скоростью 2 л/ч, затем с той же скоростью подавался поток воздуха.

Выбранная температура отжига образцов соответствует температуре разложения солей серебра и палладия до свободных металлов.

**Обсуждение результатов.** На рисунках 1, 2 представлены зависимости чувствительности к диоксиду азота образцов  $WO_3$  и композиций  $WO_3-Ag(1,5 \%$  мас.),  $WO_3-Co_3O_4(5 \%$  мас.)– $Ag(1,5 \%$  мас.) Видно, что влияние обеих добавок заключается как в увеличении сенсорного отклика к газовой смеси, содержащей диоксид азота (3,4 ppm  $NO_2$ ), так и в увеличении скорости адсорбции газа.

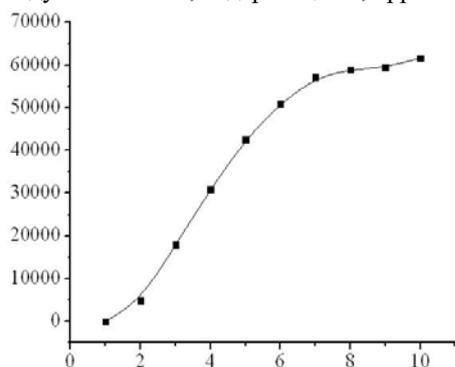
На рисунке 3 представлен график зависимости сенсорного отклика композиции  $WO_3-Ag(1,5 \%$  мас.) при воздействии газовой смеси, содержащей 3000 ppm  $CO$  в азоте. Максимальная чувствительность (291 %) выше соответствующего значения для оксида вольфрама (60 %) в 4,85 раза.

Газовая чувствительность оксида вольфрама и исследованных композиций на его основе к оксиду углерода начинается выше 170 °C и максимальна при 240–250 °C.



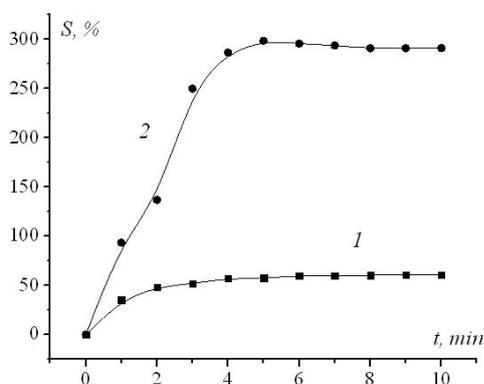
1 –  $\text{WO}_3$ , (162 °C), 2 –  $\text{WO}_3 + 1,5\%$  мас. Ag (187,2 °C).

Рисунок 1 – Сенсорный отклик к газовой смеси, содержащей 3,4 ppm  $\text{NO}_2$



1 –  $\text{WO}_3$ , 2 –  $\text{WO}_3 + 1,5\%$  мас. Ag (187,2 °C).

Рисунок 2 – Сенсорный отклик к газовой смеси, содержащей 3,4 ppm  $\text{NO}_2$



1 –  $\text{WO}_3$  (243,7 °C), 2 –  $\text{WO}_3 + 1,5\%$  мас. Pd (240,3 °C).

Рисунок 3 – Сенсорный отклик к газовой смеси, содержащей 0,3 % CO в азоте

Улучшение газочувствительных характеристик оксидов в присутствии благородных металлов принято связывать с т. н. эффектом спилловера и с электронным взаимодействием между оксидной матрицей и внедренными в неё нанокластерами металлов.

Эффект спилловера представляет собой перенос адсорбированных на твёрдой поверхности частиц на находящиеся с ним в контакте другой

твёрдый материал, обычно обладающий меньшей адсорбционной активностью. В нашем случае кластеры Pd и Ag способствуют диффузии кислорода и облегчают таким образом реакцию между CO и адсорбированными формами кислорода. Специфика электронного взаимодействия определяет набор возможных поверхностных реакций с участием детектируемого газа. Поэтому решение задачи увеличения чувствительности сводится к выбору таких условий производства и эксплуатации газочувствительных материалов, при которых бы наблюдались преимущественно процессы инъекции или поглощения носителей заряда (электронов и дырок). Такие условия зависят от размера частиц нанокластеров и от вида детектируемого газа.

Можно предположить, что кластеры Pd и Ag в исследованном нами температурном интервале являются активными центрами газочувствительных реакций и элементами проводящих каналов для переноса электронов от газов – восстановителей к p – полупроводнику ( $\text{WO}_3$ ).

**Выводы.** Добавка 1,5 % мас. Ag в состав газочувствительного слоя на основе исследованной ранее композиции  $\text{WO}_3\text{-Co}_3\text{O}_4$  (5% мас.) приводит к существенному возрастанию чувствительности к диоксиду азота. Наблюдается совместное влияние добавок оксида кобальта и серебра на увеличение чувствительности к диоксиду азота оксида вольфрама при одновременном улучшении электрофизических свойств (снижении электрического сопротивления) газочувствительной композиции.

Введение в состав газочувствительных композиций на основе оксида вольфрама добавки Pd может быть рекомендовано для увеличения чувствительности полупроводниковых датчиков к оксиду углерода (CO).

#### Литература

1. Гайдук, Ю. С. Газовые сенсоры на основе композиций  $\text{WO}_3$  с  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и многостенными углеродными нанотрубками / Ю. С. Гайдук [и др.] // Приборостроение–2015: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 25–27 ноября 2016 г.: в 2 т. / под ред. О.К. Гусева [и др.]. – Минск: БНТУ, 2015. – Т. 1. – С. 67–69.
2. Гайдук, Ю. С. Датчики диоксида азота на основе композиции  $\text{WO}_3\text{-In}_2\text{O}_3$  / Ю. С. Гайдук [и др.] // Приборостроение–2016: материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г.: в 2 т. / под ред. О.К. Гусева [и др.]. – Минск: БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 294–296.

УДК 621

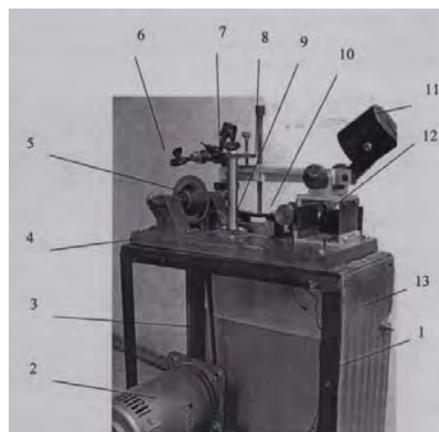
**ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗАГОТОВКИ****Киселев М.Г., Ямная Д.А.***Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Операция механического распиливания исходного сырья из хрупких неметаллических материалов выполняется с целью его разделения на штучные заготовки. Она широко применяется в технологии оптического и электронного приборостроения, а также в ювелирном производстве. В отличие от токопроводящих материалов, для разделения которых помимо механического могут быть эффективно использованы электроэрозионный и электрохимический методы обработки [1, 2], распиливание неметаллических материалов осуществляется, как правило, путем их механической обработки. Наиболее высокие требования в отношении точности и качества обработанных поверхностей предъявляются при распиливании дорогостоящего сырья – кристаллов алмаза. Несмотря на разработку и применение новых способов разделения кристаллов алмаза, в частности лазерного и термохимического, способ их механического распиливания по-прежнему широко используется в промышленности. Одним из направлений повышения производительности выполнения данной операции и качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов является сообщение заготовке (кристаллу) вынужденных колебаний, действующих перпендикулярно режущей поверхности распиловочного диска и обеспечивающих условия виброударного режима их взаимодействия [3]. Вместе с тем, для более эффективного управления параметрами этого режима, а соответственно условиями протекания процесса распиливания, представляется перспективным сообщать заготовке не одномерное колебательное, а двумерное периодическое циркуляционное движение, совершаемое ею в плоскости распиливания.

Для практического использования результатов проведенных исследований необходимо было последовательно решить следующие задачи: 1) создать станочное оборудование (распиловочную секцию), позволяющее осуществлять операцию распиливания при сообщении заготовке управляемого циркуляционного движения; 2) определить рациональные режимы выполнения операции, обеспечивающие ее наибольшую производительность и наилучшее качество обработанных поверхностей заготовки, на основе которых разработать операционную технологию распиливания; 3) провести испытания созданного оборудования и разработанной технологии.

В качестве базового варианта, на основе которого была создана распиловочная секция, использовалась промышленная распиловочная секция станка модели ШП-2. Поэтому создание

нового варианта секции в принципе следует рассматривать как мало затратную модернизацию ее промышленной конструкции. На рисунке 1 приведена фотография модернизированной распиловочной секции.



1 – корпус; 2 – электродвигатель; 3 – плоский ремень; 4 – основание распиловочной секции; 5 – шпиндельный узел; 6 – устройство закрепления заготовки; 7 – узел верхнего ограничителя; 8 – стрела; 9 – узел нижнего ограничителя; 10 – узел привода вращения эксцентриситета; 11 – противовес; 12 – узел качания стрелы

Рисунок 1 – Модернизированная распиловочная секция со снятой боковой обшивкой

Корпус секции выполнен в виде сварной (из стальных уголков) конструкции 1, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда. С боковых сторон корпус закрыт листами 13 из жести. На верхней части корпуса закреплено основание 4 распиловочной секции, на котором смонтированы все ее узлы: в частности, шпиндельный узел 5, стрела 8 с устройством закрепления и ориентации заготовки 6 и противовесом 11 на ее другом конце; узел качания стрелы 12, установленный на плоских пружинах; узел привода вращения эксцентрика 10; узел нижнего 9 и верхнего 7 ограничителей вертикального перемещения стрелы. Внутри корпуса размещен электродвигатель 2 привода вращения шпинделя и плоский ремень 3 для передачи последнему вращательного движения.

Проведенные предварительные испытания показали, что созданный опытный образец модернизированной распиловочной секции является работоспособным. Он позволяет выполнять операцию распиливания как в обычных условиях, так и при сообщении заготовке управляемого циркуляционного движения.

В таблице 1 приведены полученные в результате исследований рациональные значения частоты возбуждения колебательной системы ( $f$ ) и статической нагрузки ( $P_{ст}$ ), при распиливании на модернизированной секции. Постоянными параметрами режима распиливания приняты: частота вращения диска, равная  $7500 \text{ мин}^{-1}$  ( $V_{кр} = 27 \text{ м/с}$ ); амплитуда вынужденных колебаний  $A_0 = 3,5 \text{ мм}$ ; величина зазора  $Z = 3 \text{ мм}$ .

Таблица 1 – Рациональные значения частоты возбуждения колебательной системы и статической нагрузки при распиливании на модернизированной распиловочной секции

Номер и наименование перехода выполнения операции распиливания	$f$ , Гц	$P_{ст}$ , Н
1 Начало распиливания (врезание)	0	1,2
2 Основное распиливание	3,6	2,2
3 Окончание распиливания (разделение заготовки на части)	1,7	1,2

С использованием модернизированной распиловочной секции и установленных рациональных режимов обработки были проведены опытно-промышленные испытания разработанной технологии по распиливанию заготовок из различных материалов, предоставленных заинтересованными организациями. В частности, заготовки из шпинели, александрита и сапфира были предоставлены НП ООО «Соликс»; образцы из фианита предоставлены ООО «Фает»; образцы из карбида кремния предоставлены ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Распиливание заготовок осуществлялось в одном случае по традиционной технологии с изменением значения только статической нагрузки  $P_{ст}$  (показатели  $i_0$ ,  $R_{a0}$ ), а во втором – по разработанной технологии с использованием рациональных режимов обработки (показатели  $i_1$ ,  $R_{a1}$ ). Данные приведены в таблице 2

В качестве инструмента использовали стальной отрезной диск диаметром 72 мм с алмазосодержащим покрытием из микропорошка 60/40, частота его вращения составила  $7500 \text{ мин}^{-1}$ , СОЖ не применялось.

Продолжительность распиливания образцов  $t$  определялась по показаниям секундомера, который запускался при начале процесса распиливания и останавливался в момент разделения образца на части. Интенсивность распиливания  $i$  ( $\text{мм}^2/\text{мин}$ ) определялась отношением  $t/F$ , где  $F$  – площадь распиленной поверхности образца. Было проведено пять распилов образцов по традиционной технологии и пять – по разработанной. За окончательные значения  $t$ ,  $R_a$  и  $i$  были приняты средние арифметические значения указанных параметров.

После распиливания исходных заготовок на полуфабрикаты исследовалось качество их

обработанных поверхностей. В частности, с помощью профилометра-профилографа фирмы Taylor Hobson измеряли их шероховатость в направлении, совпадающем с движением гравитационной подачи. Состояние топографии распиленной поверхности визуально оценивалось по полученным с помощью микроскопа, оснащенного цифровой камерой, фотографиям.

Таблица 2 – Результаты опытно-промышленных испытаний разработанной технологии по распиливанию заготовок из различных материалов

Материал заготовки	Твердость по шкале Мооса	Значение отношения $i_1/i_0$	Значение отношения $R_{a1}/R_{a0}$
Шпинель	8,0	1,25	1,10
Фианит	8,0	1,46	2,27
Александрит	8,5	1,23	1,17
Сапфир	9,0	3,67	1,74
Карбид кремния	9,1–9,5	1,80	2,41

Из сравнительного анализа полученных данных следует, что во всех случаях использование разработанной технологии позволяет в сравнении с традиционной повысить интенсивность процесса распиливания указанных материалов и одновременно снизить значение высотного параметра  $R_a$  шероховатости поверхности распиленных полуфабрикатов. При этом, в общем, с повышением твердости обрабатываемого материала эффективность применения разработанной технологии возрастает, некоторый разброс значений отношения  $i_1/i_0$  и  $R_{a1}/R_{a0}$  обусловлен анизотропией физических свойств минералов.

Так, при распиливании шпинели и фианита (8 единиц твердости) интенсивность процесса возросла в 1,25–1,46 раза, а значение параметра  $R_a$  снизилось в 1,10–2,27 раза. При распиливании сапфира и карбида кремния (9 и более единиц твердости) интенсивность процесса возросла в 1,80–3,67 раза, а значение параметра  $R_a$  снизилось в 1,74–2,41 раза.

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие : в 2 т. / Б.А. Артамонов [и др.]; под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 2: Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии. – 208 с.
2. Житников, В.П. Импульсная электрохимическая безмерная обработка / В.П. Житников, А.Н. Зайцев. – М.: Машиностроение, 2008. – 413 с.
3. Дроздов, А.В. Повышение производительности и качества распиливания сверхтвердых кристаллов путем сообщения заготовке вынужденных колебаний : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / А.В. Дроздов ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2005. – 21 с.

УДК 621.9.022

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ КАЧЕСТВ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Луговой В.П.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Под декоративностью, как правило, понимают состояние поверхности, которое может характеризоваться цветом, тоном, текстурой и фактурой. Декор относится к категориям композиции, художественный смысл которого заключается во взаимодействии с окружающей средой – пространством, объемом, массой, плоскостью, форматом, качеством декорируемой поверхности. Декоративности объектов в дизайне придают особое значение ввиду того, что представляет собой один из самых активных способов художественного восприятия и воздействия на зрителя.

Декоративное оформление ювелирных изделий позволяет получить существенный экономический эффект по двум причинам. Одна из них заключается в достижении высокой художественной ценности и достижении роскошного вида украшений, а вторая в возможности увеличения ассортимента выпускаемых предприятием изделий на базе одной и той же модели, но за счет различного внешнего оформления.

Для достижения декоративности ювелирных изделий используют различные технологические методы. Многие из них известны из древних времен. Однако современные технологии, основанные на использовании достижений науки и техники, позволяют получить совершенно новые эстетические качества изделий. Большое число разнообразных методов декоративной отделки поверхностей зависит от вида материала-основы предмета и материала-покрытия; уровня механизации труда и технологических способов декоративной обработки.

Дизайн ювелирных изделий отличается многообразием применяемых материалов и методов обработки и имеет более широкое поле для проявления творческих замыслов, в отличие от дизайна проектируемых объектов прочих отраслей промышленности. Ограничением могут служить лишь санитарно-гигиенические требования и требования по безопасности их использования.

По виду рода материалов, используемых в ювелирном деле, их можно разделить на следующие группы:

- 1) драгоценные металлы и сплавы;
- 2) недрагоценные металлы и сплавы;
- 3) хрупкие материалы типа стекла, керамики, фарфора и пр.;
- 4) пластичные материалы – пластмасса, кожа, бумага и пр.;

5) ювелирные камни.

Новые дизайнерские решения получены на основе применения драгоценных металлов: сплавов платины, сплавов золота и серебра с различными цветами в результате введения различных лигатур.

По степени механизации эти методы делятся на ручные, механизированные и автоматизированные.

По виду технологического процесса они разделяются на:

- новые способы литья;
- механическую обработку методами резания,
- обработку давлением,
- обработку химическими и электрохимическими методами,
- обработку материалов электрофизическими и электрохимическими методами,
- термическую обработку,
- распылением в вакууме или нанесением на поверхность покрытий,
- инкрустацией,
- облагораживанием ювелирных камней.

Среди перечисленных методов декоративная обработка путем управления режимами термической обработки металла позволяет получить оригинальные рисунки и узоры на поверхности металлов.

Перспективные направления в современном дизайне открывают инновационные методы дизайна с использованием IT - технологий, микроэлектроники и нанотехнологий, которые позволяют получить интересные варианты технических решений для создания оригинальных фактурных и текстурных покрытий.

Таким образом, можно заключить, что современный технический уровень ювелирного производства на современном этапе претерпевает существенные изменения. Отрасль, где традиционно преобладал ручной труд, претерпевает коренные изменения в технологии производства изделий, в том числе и в процессах проектирования, дизайна и декоративной отделки.

### Литература

Галанин С.И. Дизайн, материалы и технология изготовления современных ювелирно-художественных изделий / С.И. Галанин, К.Н. Колупаев. – Кострома: Изд-во КГТУ, 2014. – 183 с.

УДК 621

## ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОДАЧЕЙ

Киселев М.Г., Ямная Д.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

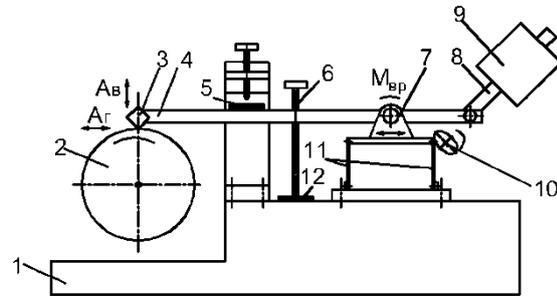
Механическое распиливание заготовок из хрупких неметаллических материалов, в частности полупроводников, стекла, керамики, естественных и искусственных кристаллов, поделочных и драгоценных камней широко используется в электронной промышленности, в технологии оптического и электронного приборостроения, а также в ювелирном производстве. Весьма специфическими технологическими особенностями характеризуется способ механического распиливания кристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий. Во-первых, это уникальная твердость обрабатываемого материала, а во-вторых, его очень высокая стоимость, что накладывает весьма жесткие требования по минимизации безвозвратных потерь этого сырья в процессе распиливания.

Авторами [1, 2] предложена технология распиливания хрупких неметаллических материалов с циркуляционным движением заготовки, позволяющая повысить производительность выполнения операции при снижении шероховатости поверхности площадок распиленных полуфабрикатов в сравнении с обработкой по традиционной технологии.

На основании анализа особенностей традиционной схемы распиливания кристаллов алмаза [3] (центр тяжести противовеса на стреле расположен выше оси ее качания) авторами обоснована возможность придания заготовке в плоскости распиливания двухмерного циркуляционного движения за счет сообщения узлу качания стрелы вынужденных колебаний, направленных вдоль горизонтальной оси. Исходя из этого, разработана колебательная система (рисунок 1), с использованием которой создана экспериментальная распиловочная секция.

В отличие от промышленной в ней узел качания стрелы жестко не связан с основанием, а установлен на упругом плоскопараллелограмном подвесе, верхней (подвижной) части которого от вращающегося эксцентрика сообщаются колебания в горизонтальном направлении  $A_{г}$ . За счет возникающих виброускорений на противовес действуют инерционные силы, которые создают переменный вращающий момент  $M_{вр}$ , вызывающий поворот стрелы относительно оси ее качания, что сопровождается перемещением закрепленной на ее конце заготовки в вертикальном направлении  $A_{в}$ . В результате сложения двух одномерных компланарных

колебаний заготовка совершает двухмерное периодическое циркуляционное движение.



1 – основание; 2 – распиловочный диск; 3 – заготовка; 4 – стрела; 5 – верхний упругий ограничитель; 6 – регулировочный винт; 7 – узел качания стрелы; 8 – поворотный рычаг; 9 – противовес; 10 – механический вибратор; 11 – плоские пружины; 12 – нижний упругий ограничитель

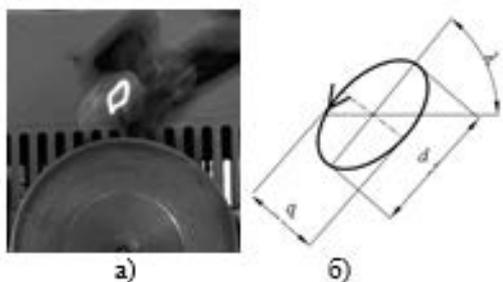
Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной распиловочной секции

Экспериментально определены исходные параметры и характеристики созданной распиловочной секции (собственная частота, предельная линейная деформация упругого подвеса), что позволило установить рациональные режимы возбуждения колебательной системы. Так, частота вынужденных колебаний не должна превышать 5 Гц, а их амплитуда должна быть не более 3,5 мм.

При работе колебательной системы только с одним нижним ограничителем устойчивое двухмерное циркуляционное движение заготовки обеспечивается в узком частотном диапазоне ее возбуждения  $f = 2,8 - 3,5$  Гц при статическом нагружении (усилии прижатия опорного винта к ограничителю)  $P_{ст.в} = 1,0 - 2,2$  Н.

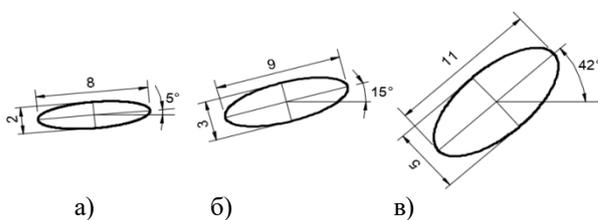
Стабильное и управляемое циркуляционное движение заготовки обеспечивается в случае использования двух ограничителей (верхнего и нижнего) и при реализации виброударного режима их взаимодействия со стрелой. В этих условиях траектория движения заготовки (рисунок 2а) имеет форму, близкую к эллипсу (рисунок 2б), что позволяет использовать для его характеристики следующие параметры: величину большой  $d$  и малой  $q$  осей эллипса, угол  $\lambda$  наклона его большой оси к горизонтали и период циркуляционного движения  $T_{ц}$ . При этом за счет изменения режимов возбуждения колебательной системы (частоты  $f$ , величины зазора  $Z$  между стрелой и верхним

ограничителем и статического усилия  $P_{ст}$  прижатия заготовки к диску) можно целенаправленно влиять на параметры эллиптической траектории движения заготовки (рисунок 3).



а – траектория движения; б – параметры эллиптической траектории движения

Рисунок 2 – Траектория движения светящейся точки, принадлежащей заготовке, при возбуждении колебательной системы с двумя ограничителями



а –  $f = 1,7$  Гц; б –  $2,8$  Гц; в –  $3,6$  Гц

Рисунок 3 – Влияние частоты  $f$  возбуждения колебательной системы на параметры эллиптической траектории движения заготовки

В результате исследования режимов возбуждения колебательной системы на повышение производительности выполнения операции и качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, с учетом простоты и удобства их регулирования на производственном участке, определены рациональные значения технологических параметров выполнения операции распиливания на модернизированной распиловочной секции станка ШП-2, учитывающие условия выполнения ее отдельных переходов и обеспечивающие по сравнению с обработкой в обычных условиях наибольшее повышение интенсивности распиливания хрупких неметаллических материалов (от 1,25 до 2,28 раза в зависимости от их твердости) и снижение шероховатости поверхности площадок распиленных полуфабрикатов в 1,10–2,43 раза. В частности, при постоянных значениях  $n_d = 7500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $Z = 2,5\text{--}3,0 \text{ мм}$ ,  $A = 3,5 \text{ мм}$  на переходе «врезание»  $f = 0$ ,  $P_{ст} = 0,6 \text{ Н}$ , на переходе «основное распиливание»  $f = 3,6 \text{ Гц}$ ,  $P_{ст} = 1,1 \text{ Н}$  и на переходе «окончание распиливания»  $f = 1,7 \text{ Гц}$ ,  $P_{ст} = 0,6 \text{ Н}$ .

Разработанная технология позволяет интенсифицировать процесс разрушения хрупких неметаллических материалов за счет реализации

виброударного режима взаимодействия заготовки с режущей поверхностью диска. Оправдано полагать, что виброударный режим распиливания будет оказывать влияние на уровень эксплуатационных показателей отрезного диска, в частности на величину его относительной или удельной износостойкости. Под последней будем понимать суммарную пропиленную площадь данного образца одним диском до момента, когда интенсивность распиливания им не снизится до двух раз от первоначальной.

Для изучения этого вопроса проведена отдельная серия экспериментов по следующей методике. Были использованы два одинаковых отрезных алмазных диска (АСН 60/40), которыми распиливались образцы из яшмы в одном случае в обычных условиях ( $P_{ст.в} = 6,5 \text{ Н}$ ), а в другом – с возбуждением колебательной системы ( $f = 4 \text{ Гц}$ ,  $Z = 3 \text{ мм}$  и  $P_{ст.в} = 6,5 \text{ Н}$ ). При этом в обоих случаях фиксировалось изменение интенсивности распиливания ( $i_0/i_k$ ) по мере увеличения количества обработанных образцов и определялась суммарная площадь распила ( $F$ ), полученная одним диском до момента, когда  $i_k = 0,5i_0$ .

Результатами исследований установлено, что при уменьшении интенсивности распиливания в два раза по сравнению с первоначальной суммарная площадь распиленной поверхности образцов при обработке в обычных условия  $F_t$  составила  $168,5 \text{ мм}^2$ , при обработке с возбуждением колебательной системы  $F_{ц} = 882,3 \text{ мм}^2$ . Из сравнения полученных данных следует, что сообщение образцу циркуляционного движения, обеспечивающего виброударный режим распиливания, повышает по сравнению с обработкой в обычных условиях относительную износостойкость отрезного диска более чем в пять раз. Это свидетельствует о том, что наличие циркуляционного движения заготовки создает благоприятные условия для работы алмазных зерен, закрепленных на поверхности диска, в результате чего они более длительное время сохраняют высокую режущую способность.

С помощью инфракрасного пирометра НИМБУС (диапазон измерений от 0 до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , цена деления  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) была измерена интегральная температура в зоне обработки при распиливании образцов из стекла, яшмы и корунда. По результатам проведенных экспериментов установлено, что сообщение образцу циркуляционного движения не оказывает по сравнению с распиливание в обычных условиях существенного влияния на изменение температуры в зоне обработки, значение которой находилось в пределах  $24\text{--}32 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Литература

1. Ямная, Д. А. Технология механического распиливания хрупких неметаллических материалов с циркуляционным движением

заготовки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Д. А. Ямная ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – 23 с.

2. Установка для обработки кристалла алмаза : пат. ВУ 20660 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная. – Опубл. 12.2016.

3. Епифанов, В. И. Технология обработки алмазов в бриллианты : учебник / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков ; под ред. В. И. Епифанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1982. – 351 с.

УДК 621.385.6

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Волкенштейн С.С.<sup>1</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>, Соловьев Я.А.<sup>2</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>2</sup>, Хмыль А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Планар-СО»

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ»

<sup>3</sup>УО «БГУИР»

Минск, Республика Беларусь

Мощные ДМОП транзисторы в металлокерамическом корпусе типа КТ-97В, С работают в основном в режиме электронного ключа при максимальной токовой нагрузке порядка 30÷40 А. В процессе эксплуатации периодически происходит нагрев активной структуры транзистора, который будет тем выше, чем больше переходное тепловое сопротивление «р-п переход - корпус». Поэтому повышение устойчивости мощного транзистора к циклическому тепловому воздействию является актуальной задачей.

Конструкция корпуса КТ-97В содержит термокомпенсатор, который выполняет важнейшую функцию согласования коэффициентов термического линейного расширения (КТЛР) кремниевого кристалла и медного основания для снижения термических напряжений в кристалле мощного транзистора. В качестве термокомпенсатора используют молибденовые псевдосплавы, например, МД-40. Недостатком таких термокомпенсаторов является недостаточная теплопроводность, что способствует росту переходного теплового сопротивления. Теплопроводность можно повысить за счет увеличения содержания меди с 40% до 50% (МД-50). Однако это создает условия для роста КТЛР и может способствовать возникновению термических напряжений в кристаллах, монтаж которых выполняется на эвтектику Au-Si. В данной работе представлены результаты сборки и испытаний мощного транзистора в металлокерамическом корпусе КТ-97В с разным финишным покрытием (хим. НЗ и хим. НЗ3л4) с использованием термокомпенсаторов двух типов МД-40, МД-50.

Монтаж кристаллов ДМОП транзисторов КП7209 в корпус с золотым покрытием выполнялся на эвтектику Au-Si на автомате ЭМ-4085, а в корпус с никелевым покрытием – в конвейерной печи на припой ПОС-10 по касетной технологии сборки. После сборки по полному маршруту годные транзисторы подвергались длительным воздействиям термоударов при минус 196 °С (5 мин) и плюс 200 °С (10 мин) с

последующей оценкой уровня теплового сопротивления.

В процессе исследований было установлено, что использование термокомпенсатора МД-50 для приборов в корпусе с никелевым покрытием способствует получению теплового сопротивления в пределах 0,55÷0,72 °С/Вт, а для МД-40 уровень существенно выше и составляет 0,85÷0,96 °С/Вт. После термоударов отмечается рост теплового сопротивления с 0,55 до 0,65 °С/Вт для МД-50 с пайкой кристаллов на припой при температуре 390 °С (рисунок 1, а).

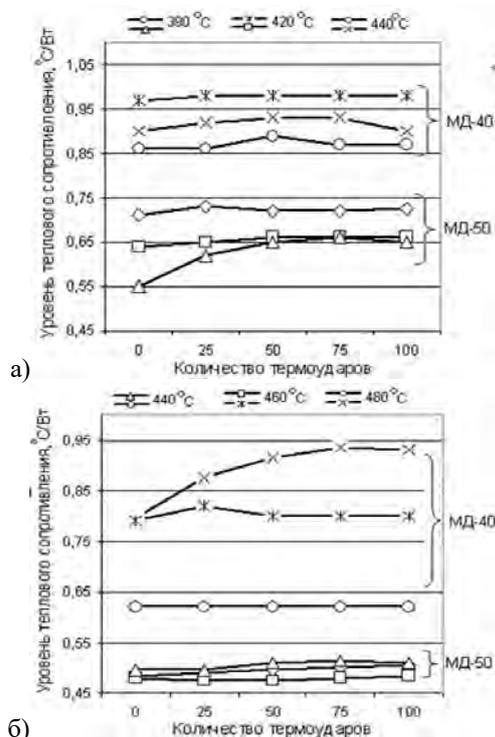


Рисунок 1 – Влияние термоударов на изменение теплового сопротивления транзистора с разным способом монтажа кристаллов: а – монтаж на припой; б – монтаж на эвтектику Au-Si

При воздействии длительных термоударов изменение уровня теплового сопротивления незначительные для эвтектической пайки с использованием MD-50. Для MD-40 в условиях пайки при максимальной температуре 480 °С отмечается рост теплового сопротивления от 0,77 до 0,93 °С/Вт, а при температуре пайки 440 °С изменения минимальны (рисунок 1, б).

Дополнительные исследования показали, что с ростом температуры пайки кристаллов отмечается увеличение дефектов в виде пустот и непропаев в соединительном слое под кристаллом (рисунок 2).

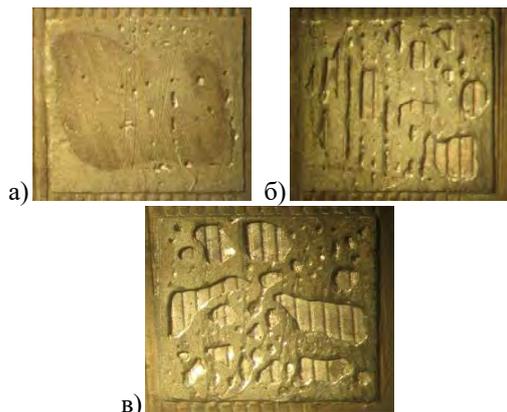


Рисунок 2 – Структура припоя под кристаллом после пайки при температуре 400°С (а), 420 °С (б), 440 °С (в)

Оценка качества восьми монтажных конструкций «подложка – припой – п/п кристалл» проводилась методом лазерной интерферометрии по критерию значения остаточных механических напряжений (ОМН) в структуре п/п кристаллов и характера искривления их планарной поверхности (рисунок 3), а также методом лазерной фотоакустической микроскопии (рисунок 4) с последующим удалением кремния травлением в щелочи (рисунок 5).

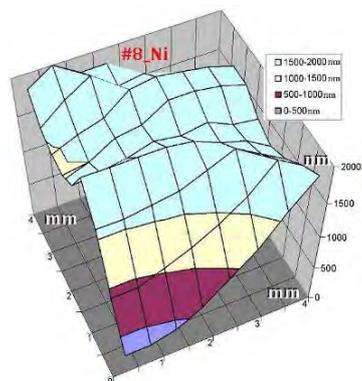


Рисунок 3 – Типовая 3D модель искривления поверхности кристалла (кассетная технология сборки)



Рисунок 4 – Типовая лазерная фотоакустическая топограмма монтажной конструкции (кассетная технология сборки)



Рисунок 5 – Дефекты в припое под кристаллом после травления кремния

В процессе длительных термоциклических воздействий выявлено максимальное изменение переходного теплового сопротивления для приборов с напайкой кристаллов на легкоплавкий припой в результате усталостного разрушения и повышенной плотности непропаев под кристаллом.

Таким образом, для повышения устойчивости мощного транзистора в металлокерамическом корпусе к циклическому воздействию температуры в экстремальных условиях при -196...+200 °С целесообразно использовать термокомпенсатор МД-50 вместо МД-40, а монтаж кристаллов выполнять методом эвтектической пайки на автоматизированном оборудовании при оптимальных технологических режимах.

#### Литература

1. Волкенштейн С.С., Хмыль А.А. Неразрушающие методы контроля качества монтажа полупроводниковых кристаллов в корпуса ИМС / Технологии в электронной промышленности. – 2011. – №2. – С. 18-22.
2. Волкенштейн С.С., Дайняк И.В., Хмыль А.А. Сравнительная оценка альтернативных методов контроля качества и диагностики монтажных конструкций «п/п кристалл - подложка» // Доклады БГУИР. – 2016. – № 2. – С. 51-55.

УДК 621.793.2:539.234

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ TiBN РЕАКТИВНЫМ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ

Телеш Е.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Республика Беларусь

Для получения пленочных структур с различными свойствами и для различных целей используется большое многообразие материалов. Покрытия из TiBN обладают уникальным сочетанием экстремальных термомеханических свойств, радиационной стойкости, электрофизических параметров в сочетании с высокой твердостью и прочностью, технологической и коммерческой значимостью [1]. Широко известны примеры эффективного использования TiBN в качестве материалов атомной, химической индустрии, для получения конструкционной керамики, при производстве абразивов, защитных покрытий, износостойких материалов. Эти соединения также примечательны тем, что обладают целым набором свойств, которые необходимы при получении пленочных структур: тугоплавкость, химическая инертность и стойкость, высокие электро- и теплопроводность, износостойкость, пластичность [2].

Формирование покрытий из TiBN осуществляли на модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017. В качестве ионного источника использовался двухлучевой плазменный ускоритель с анодным слоем. Вакуумный объем откачивался диффузионным насосом, что обеспечило получение остаточного вакуума  $(2-3) \cdot 10^{-3}$  Па. Покрытия из TiBN наносились на подложки из окисленного кремния, кремния с использованием метода реактивного ионно-лучевого распыления составной мишени Ti/BN в среде аргона и азота. В качестве основного материала мишеней использовались листы титана марки BT1-0 ГОСТ 19807-91. Размер листа составлял 45 x 45 x 1 мм. В качестве второго материала использовались пластины пиролитического нитрида бора марки ВП ТУ 6-02-669-83 толщиной 1,5 мм. Массовая доля бора составляла 43–44 %, азота – 56–57 %. Для монтажа пластин нитрида бора на поверхность мишени из титана использовалось ультразвуковое лужение и пайка припоем Sn-10 % Zn. Внешний вид полученных мишеней показан на рисунке 1.

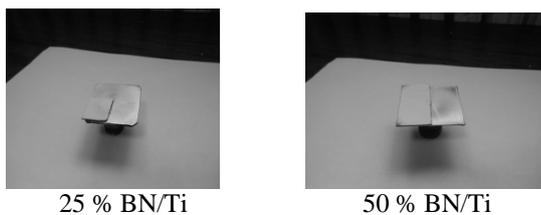


Рисунок 1 – Внешний вид составных мишеней

Исследованы процессы взаимодействия ионов аргона и азота с составными мишенями.

Установлено, что при распылении мишени 25 % BN/Ti ионами аргона скорость нанесения составляла 0,20 нм/с, а при распылении мишени 50 % BN/Ti – 0,22 нм/с. При распылении мишеней ионами аргона и азота происходило снижение скорости нанесения до 0,12 нм/с (25 % BN/Ti) и 0,17 нм/с (50 % BN/Ti) при парциальном давлении азота  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па (рисунок 2).

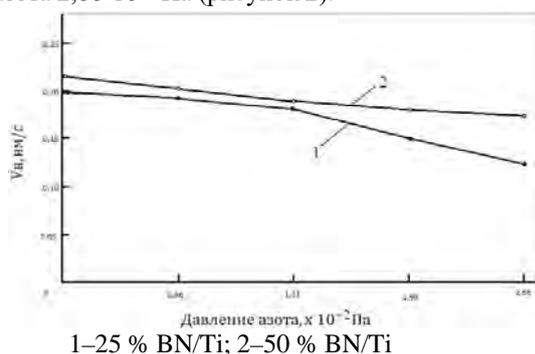


Рисунок 2 – Влияние парциального давления азота на скорость нанесения покрытий из TiBN

Уменьшение скорости нанесения при росте содержания азота в рабочем газе можно объяснить меньшим коэффициентом распыления по сравнению с аргоном.

Установлено, что с ростом парциального давления азота в рабочем газе происходит увеличение удельного объемного сопротивления. Это можно объяснить тем, что при повышении давления азота повышается соотношение BN/Ti в покрытии, что приводит к росту удельного сопротивления (рисунок 3).

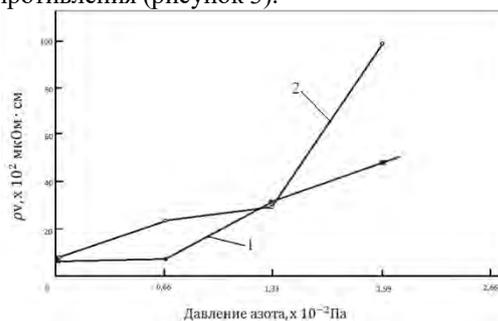


Рисунок 3 – Влияние парциального давления азота на удельное объемное сопротивление покрытий из TiBN

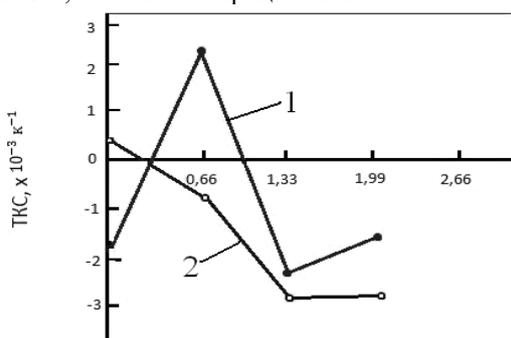
Распыление мишени 50 % BN/Ti привело к более высокому уровню  $\rho_v$  – при давлении азота  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па его не удалось измерить с использованием измерителя ИУС-3. Покрытия, нанесенные при высоких парциальных давлениях

азота меняли также свою окраску – со светло-серой металлической на радужную.

Температура подложки варьировалась от 313 до 673 К, давление азота составляло  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Исходя из графика, приведённого на рисунке 4,  $\rho_v$  покрытий из TiBN значительно зависит от температуры подложки. Это можно объяснить некоторым ростом зерна, уплотнением структуры покрытия, десорбцией аргона и активных газов из пленки. Установлено, что покрытия, полученные распылением составной мишени 50 % BN/Ti, показали меньшее сопротивление.

На рисунке 4 представлена зависимость ТКС пленок TiBN от парциального давления азота. Покрытия наносились при и температуре подложки – 313 К.

Для покрытий, полученных распылением составной мишени 25 % BN/Ti, ТКС имеет знакопеременные значения. Увеличение давления выше  $0,66 \cdot 10^{-2}$  Па приводит к снижению уровня ТКС и переход в отрицательную область. Это можно связать с ростом диэлектрической фазы BN, наличие которой способствует механизму токопереноса путем туннелирования электронов через диэлектрический барьер. Для покрытий, полученных распылением составной мишени 50 % BN/Ti, ТКС имеет отрицательные значения.



Давление азота,  $\times 10^{-2}$  Па  
1–25 % BN/Ti; 2–50 % BN/Ti

Рисунок 4 – Зависимость ТКС пленок TiBN от парциального давления азота

УДК 621.382.002

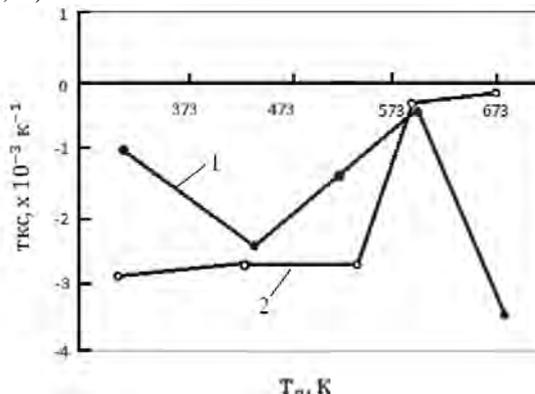
### ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiOF РЕАКТИВНЫМ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КВАРЦЕВОЙ МИШЕНИ

Телеш Е.В., Гуревич О.В., Юшкевич С.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Развитие микроэлектроники требует применения для межуровневой изоляции диэлектрических слоёв с низким значением диэлектрической проницаемости. Это необходимо для уменьшения потребляемой мощности и увеличения быстродействия в сверхбольших интегральных схемах с раз-

На рисунке 5 представлена зависимость ТКС пленок TiBN от температуры подложки. Парциальное давление азота составляло  $(1,0-1,33) \cdot 10^{-2}$  Па.



1–25 % BN/Ti; 2–50 % BN/Ti

Рисунок 5 – Зависимость ТКС пленок TiBN от температуры подложки

При увеличении температуры подложки ТКС пленок уменьшается и достигает минимума  $\sim 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  при  $T_{\text{п}} \sim 600 \text{ K}$ .

Следует отметить, что ТКС у TiBN имеют отрицательный знак и относительно небольшую величину, что делает эти материалы весьма перспективными для производства стабильных тонкопленочных резисторов.

#### Литература

- Garcia-Gonzalez, L. Structure and mechanical properties of TiBN coatings fabricated by dc reactive sputtering technique / L. Garcia-Gonzalez, J. Hernandez-Torres, P.J. Garcia-Ramirez, J. Martinez-Castillo, A. Saucedo, A.L. Herrera-May, F.J. Espinoza-Beltran // Journal of Materials Processing Technology.–2007.– V. 186. – PP. 362–366.
- Mollart, T.P. Nanostructured titaniumboronitride coatings of very high hardness / T.P. Mollart, M. Baker, J. Haupt, A. Steiner, P. Hammer, W. Gissler. // Surface and coatings technology. – 1995. – V.74–75. – P. 491–496.

мерами элементов менее 0,25 мкм [1]. Традиционные диэлектрики, например SiO<sub>2</sub>, имеют  $\epsilon=3,9$  и выше, что не удовлетворяет современным требованиям. Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок диоксида кремния применяют насыщение их фтором [2]. В данной работе фторированные плёнки диоксида кремния формировались

реактивным ионно-лучевым распылением мишени из кварца.

Формирование пленок осуществлялось в модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017, оснащённой ионно-лучевым источником на основе ускорителя с анодным слоем. Распыляемая мишень представляла собой диск из кварца высокой чистоты (ТУ0284409–108–85) диаметром 75 мм и толщиной 10 мм. Остаточный вакуум не превышал  $3,3 \cdot 10^{-3}$  Па. Рабочими газами служили аргон и фреон-218 ( $C_3F_8$ ). Плёнки формировались на подложках из кремния и кремния, покрытого пленкой никеля. Температура подложки не превышала 343 К. Толщина покрытий определялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4. Компенсация положительного заряда на мишени осуществлялась термоэлектронами. Электрофизические характеристики покрытий исследовались с применением МДМ-структур. Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись на частоте 1 МГц с помощью прибора Е7-20, а пробивное напряжение с применением характеристикографа TR-4805.

Проведено исследование влияния состава ионного пучка (состава рабочего газа) на характеристики тонкопленочных слоев из SiOF. Покрытия формировались при варьировании парциального давления фреона от 0 до  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. Ускоряющее напряжение составляло 3 кВ, ток разряда ~80 мА, ток термокомпенсатора –13 А. Скорость нанесения снижалась при увеличении парциального давления фреона до  $3,99 \cdot 10^{-2}$  Па. На рисунке 1 приведены зависимость скорости нанесения пленок от парциального давления фреона.

На рисунке 2 приведена зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  и электрической прочности пленок от парциального давления фреона.

Установлено, что до парциального давления фреона  $3,3 \cdot 10^{-2}$  Па эти первые два параметра практически не изменяются. Минимальное значение  $\epsilon$  составило 2,92 при давлении фреона  $1,2 \cdot 10^{-2}$  Па, самые низкие диэлектрические потери  $tg\delta=0,026$  –при давлении  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Однако дальнейшее повышение содержания фреона в рабочем газе приводило к резкому росту как  $\epsilon$ , так и  $tg\delta$ .

Увеличение парциального давления фреона привело к росту электрической прочности. При давлении  $C_3F_8 \sim 2,66 \cdot 10^{-2}$  Па она составила  $6,8 \cdot 10^6$  В/см.

Проведено исследование влияния энергии ионного пучка, степени компенсации и температуры подложки на характеристики тонкопленочных слоев SiOF. Энергия распыляющего ионного пучка варьировалась путем изменения ускоряющего напряжения на аноде ионного источника. Режимы нанесения

покрытий и результаты измерений приведены в табл. 1. Температура подложек для первых трех образцов составляла около 345 К, для последнего образца – 310 К.

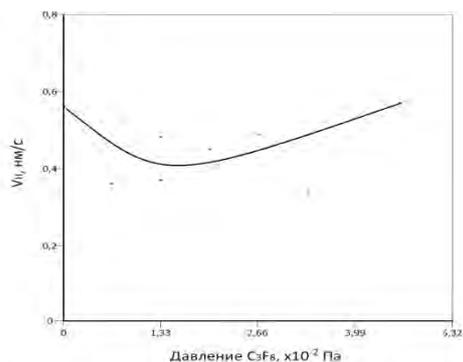
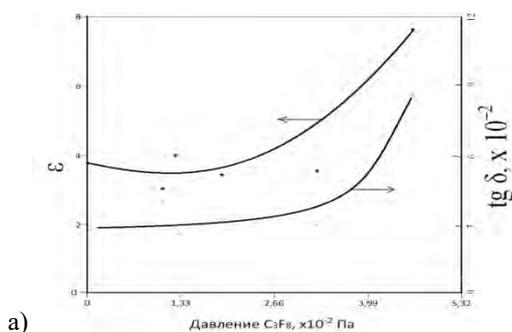
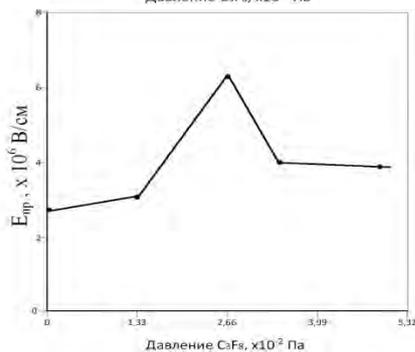


Рисунок 1 – Зависимость скорости нанесения от парциального давления фреона



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь (а) и электрической прочности (б) пленок SiOF от парциального давления фреона

Таблица 1 – Режимы нанесения покрытий и результаты измерений электрофизических характеристик тонкопленочных слоев из SiOF

$P_{CF}$ , Па	$U_a$ , кВ	$I_k$ , А	$tg\delta$	$\epsilon$	$E_{пр}$ , в/см
$2,66 \cdot 10^{-2}$	1,5	13	0,063	3,50	$2,75 \cdot 10^6$
$2,66 \cdot 10^{-2}$	2,2	13	0,028	3,01	$7,96 \cdot 10^6$
$2,66 \cdot 10^{-2}$	3,0	13	0,032	3,37	$5,30 \cdot 10^6$
$2,66 \cdot 10^{-2}$	3,0	0	0,032	4,50	$5,10 \cdot 10^6$

Было установлено, что повышение энергии ионного пучка способствует уменьшению диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, повышению электрической

прочности. Для формирования качественных слоев из SiOF оптимальная энергия пучка должна составлять 1450...1600 эВ. Влияние степени компенсации на характеристики слоев из SiOF незначительно.

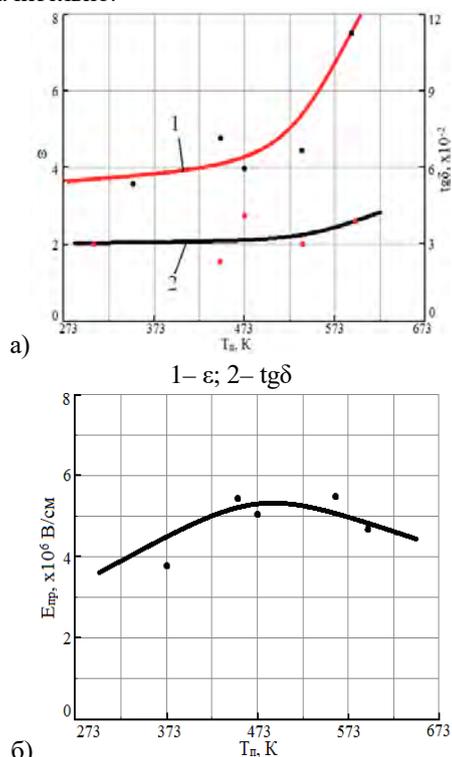


Рисунок 3 – Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  (а) и  $E_{\text{пр}}$  (б) пленок SiOF от температуры подложки

Проведено исследование влияния температуры подложки при нанесении на электрофизические характеристики покрытий из диоксида кремния, полученных осаждением из вторичного ионного пучка. Температура подложек составляла 345, 453, 473, 538 и 593 К. Парциальное содержание фреона-218 составляло  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па, аргона –  $6,66 \cdot 10^{-2}$  Па, ускоряющее напряжение – 3,0 кВ, ток компенсатора 13 А. Исследовано влияние температуры нанесения на  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{пр}}$ . Скорость нанесения изменялась в диапазоне 0,41...0,49 нм/с. Результаты измерения электрофизических параметров приведены на рисунке 3.

Установлено, что повышение температуры подложки свыше 523 К приводит к резкому росту значения диэлектрической проницаемости, что может быть связано с десорбцией фтора. В тоже время влияние температуры подложки на  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{пр}}$  незначительно.

#### Литература

1. Murarka, S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application/ S.P.Murarka // Solid State Technology. – 1996. – No 3. – P.83–89.
2. Максиль, О.В. Получение пленок SiOF прямым ионным осаждением /О.В. Максиль, Е.В. Телеш// Материалы 4-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008», 12–14 апреля 2008 г. – Севастополь. – С. 306.

УДК 666.655

### ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Шамкалович В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Как известно [1], электроизоляционные материалы работают в условиях одновременного воздействия высоких значений электрического напряжения и температуры. Такие изоляторы должны обладать высоким удельным объемным сопротивлением при нагревании, нулевым водопоглощением, высокой химической устойчивостью и т.д. Сочетание высокой механической прочности, низких диэлектрических потерь, высокого электрического сопротивления, стабильности размеров и стойкости к воздействию агрессивных сред делает керамические высокоглиноземистые материалы наиболее приемлемыми для вышеуказанных целей.

В качестве исходных сырьевых материалов, как правило, используют тугоплавкие и огнеупорные глины, каолины, пегматиты, полевые шпаты, технический глинозем, тальк, циркон, борную кислоту и др. Такие изделия изготавливают в

основном методом двухступенчатого прессования из порошкообразных масс, подготовленных совместным и тонким помолом сырьевых компонентов. При шликерной подготовке пресс-порошка необходим процесс обезвоживания суспензии. Изделия обжигаются в диапазоне температур 1320–1400 °С; щелочесодержащие компоненты позволяют снизить температуру синтеза, но при этом уменьшаются показатели электрического сопротивления и температуры эксплуатации изделий. Использование волластонита и кварцсерицитового фарфорового камня способствуют увеличению механической прочности до 80 МПа; флогопит (маложелезистая слюда изоморфного ряда биотита) уменьшает тангенс угла диэлектрических потерь и увеличивает электрическую прочность; тальк, карбонат лития и диоксид титана позволяют снизить значение ТКЛР [2].

На основе данных литературы для исследований выбрана система  $Al_2O_3-SiO_2$  в поле кристаллизации корунда с дополнением различными модифицирующими добавками ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SrO$ ,  $BaO$ ,  $CaF_2$ ). В качестве исходных сырьевых материалов для изготовления опытных образцов использовались огнеупорная глина марки «Гранитик-Веско», технический глинозём ГК-2, карбонат бария (ГОСТ 2149), карбонат стронция (ТУ 95-2326), карбонат магния (ГОСТ 6419), борная кислота (ГОСТ 18704) и фтористый кальций марки х.ч. Сырьевые компоненты подвергались совместному сухому помолу в микрошаровой мельнице до остатка на сите 0063 – 1–2 % с последующим доувлажнением массы до 7–8%.

Образцы изготавливались двухступенчатым методом при давлении прессования 20–30 МПа (образцы-цилиндры диаметром 15 мм и высотой 15–20 мм, диски диаметром 10 мм и палочки размером 5×5×55 мм). Образцы подвергались сушке в сушильном шкафу при  $100 \pm 50^\circ C$  в течении 30 мин. и обжигались в муфельной печи температурном интервале 1325–1375 °C с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Синтезированные экспериментальные образцы белого цвета без видимых включений и дефектов обладали плотноспекшейся структурой. Результаты измерения водопоглощения при различных температурах обжига представлены на рисунке 1.

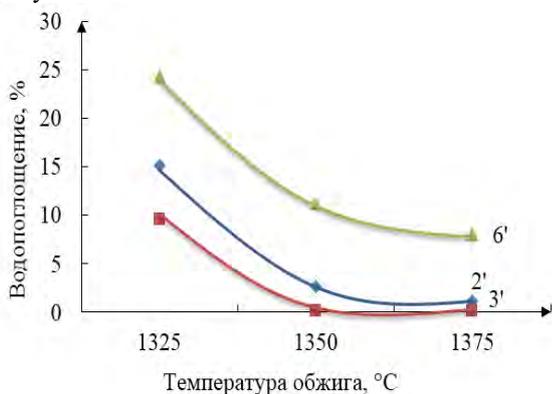


Рисунок 1 – Зависимость водопоглощения опытных образцов №2', 3', 6' от температуры обжига

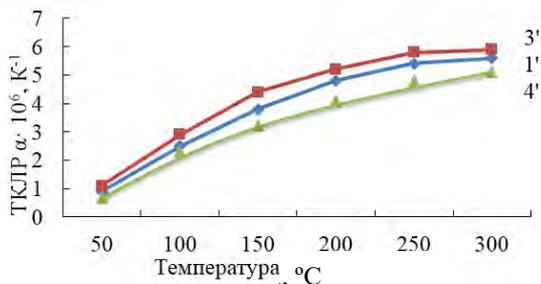


Рисунок 2 – Зависимость ТКЛР опытных образцов составов №1', 3', 4', обожженных при температуре 1325 °C, от температуры нагрева

Установлено, что с увеличением температуры обжига пористость и водопоглощение образцов закономерно снижаются в связи с повышением степени спекания.

Важнейшей характеристикой керамических материалов является температурный коэффициент линейного расширения, так как показывает, как образец изменяет свои размеры с ростом температуры. Зависимость изменения ТКЛР лабораторных образцов, синтезированных при 1325 °C, от состава и температуры нагрева представлена на рисунке 2.

Анализируя приведенную зависимость можно сделать вывод о том, что для всех опытных образцов сохраняется зависимость увеличения значений ТКЛР от температуры. С ростом температуры синтеза значения ТКЛР уменьшаются, что обусловлено увеличением количества стеклофазы, обогащенной тугоплавкими оксидами  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ .

Для высокотемпературных электроизоляторов важное значение имеет не только значение электросопротивления, но и его зависимость от температуры. С повышением температуры значительно повышается подвижность носителей заряда и электропроводимость материала. Синтезированные высокоглиноземистые материалы состоят в основном из  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ , связи Al–O и Si–O отличаются высокой степенью ковалентности, а значит и высокой прочностью. В связи с этим подвижность катионов  $Al^{3+}$  и  $Si^{4+}$  с повышением температуры увеличивается в гораздо меньшей степени, чем щелочных ионов, что обеспечивает равномерное снижение электросопротивления.

Зависимость логарифма удельного объемного сопротивления ( $\rho_v$ ) опытных образцов составов №1', №2', №3', обожженных при температуре 1350 °C, от температуры нагрева приведена на рисунке 3.

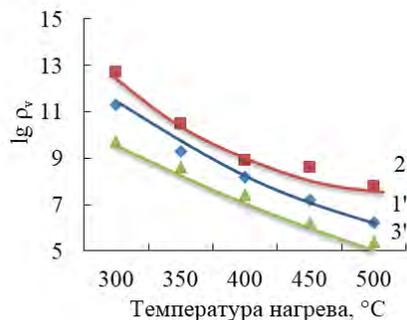


Рисунок 3 – Зависимость логарифма удельного объемного сопротивления опытных образцов от температуры нагрева

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод о том, что сохраняется зависимость снижения удельного объемного сопротивления с ростом температуры. В целом у всех образцов значения  $\rho_v$  примерно одинаковые и достаточно

высокие. Однако образцы составов с оксидом стронция обладают более высокими значениями электрического сопротивления, что обусловлено низкой подвижностью катионов  $Sr^{2+}$ .

Структура синтезированных образцов оценивалась с помощью оптического микроскопа при увеличении в 100 раз: сделан вывод о том, что в целом она однородна, при этом отчетливо видны кристаллы кварца и редкие включения железосодержащих фаз.

Фазовый состав образцов, синтезированных при 1375 °С, представлен корундом ( $Al_2O_3$ ) и небольшим количеством муллита ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ). Судя по интенсивности дифракционных максимумов кристаллической фазы муллита содержится намного меньше, чем корундовой составляющей. Это оказывает благотворное влияние на свойства материалов, так как известно, что муллит имеет более низкую температуру плавления, чем корунд, а также несколько снижает показатели электрического сопротивления. Кристаллы корунда обеспечивают высокие показатели химической стойкости, механической прочности и удельного электрического сопротивления.

Установлено, что совместное введение модифицирующих добавок карбоната бария, борной кислоты и фторида кальция позволяет снизить температуру обжига изделий на 50 °С без ухудшения их электрофизических характеристик.

В результате исследований разработан электроизоляционный керамический материал, который характеризуется следующими показателями свойств: температура обжига – 1350 °С, водопоглощение – 0,15 %; открытая пористость – 0,37 %; кажущаяся плотность – 2429,0 кг/м<sup>3</sup>; ТКЛР при 300 °С –  $5,9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ; химическая стойкость к щелочам – 99,5 %, к кислотам – 98,8 %; удельное объемное электрическое сопротивление при 100 °С –  $0,6 \cdot 10^{12} Ом \cdot м$ ; при 500 °С –  $0,9 \cdot 10^8 Ом \cdot м$ , что позволяет рекомендовать его для получения высокотемпературных электроизоляторов.

#### Литература

1. Химическая технология керамики: учеб. пособие / под ред. И. Я. Гузмана. – М.: Стройматериалы, 2013. – 493 с.
2. Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.

УДК 004.056

## ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДНК-МЕТОК

Ковыньев Н.В.

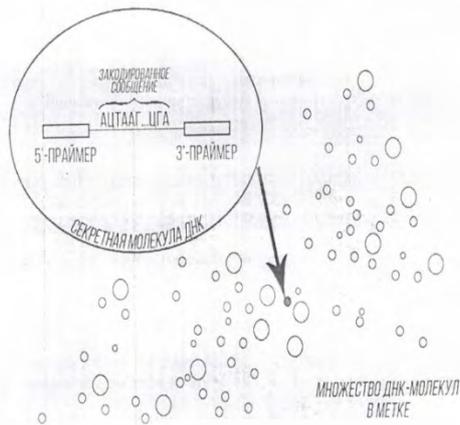
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Все формы жизни, включая человека, содержат молекулу, которая несет генетический код это жизни – ДНК. Форма молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты – двойная спираль, каждая нить которой состоит из оснований: аденина, гуанина, цитозина и тимина [1]. Они образуются в тройки (триплеты) различной последовательности, идущие друг за другом и образующие очень длинный и сложный код – нить ДНК. При связывании двух нитей, аденин может быть связан только с тимином, а цитозин только с гуанином. Каждая полимерная нить удерживается вместе с водородными связями.

Ученым удалось выявить различия в ДНК человека, которые обнаруживаются у людей с различными заболеваниями, различиями, связанными с личностью и умственной деятельностью. Знание этого сложного и уникального кода в настоящее время приводит к прорыву медицинской науки, поскольку препараты разрабатываются для лечения в обход ДНК-кода. Неудивительно, что данный код нашел свое применение не только в области медицины и биологии, а, например, в криптографии, идентификации и маркировке.

Технология ДНК основана на процедуре геномной стеганографии [2]. Стеганография – наука о скрытой передаче информации путем сохранения в тайне самого факта передачи. Ее использование с системой ДНК-меток для защищенной печати позволяет создать практически неподдельный маркер. Его невозможно взломать компьютером из-за биологической природы ДНК. Не проводя биохимические эксперименты, ни один суперкомпьютер не сможет понять, какая цепь из множества полимерных цепей является секретной.

Метод геномной стеганографии, или ДНК-метки, заключается в сокрытии секретного сообщения в ДНК. Иными словами: генерируется молекула ДНК, содержащая некоторое секретное сообщение, и с двух сторон окруженная праймерами ПЦР (5' – праймер в начале и 3' – праймер в конце) – ключами. Далее закодированное в ДНК сообщение маскируется в геном ДНК-коде организма огромной сложности (например, человека), либо в случайной ДНК-смеси. В итоге секретная молекула скрывается среди миллионов других похожих молекул. В этом заключается метод двойного сокрытия секретного сообщения, характерный для геномной стеганографии [3].



Принцип работы геномной стеганографии

Цепочка ДНК «секретного сообщения» содержит закодированное послание, окруженное последовательностями ключевых праймеров ПЦР. Шифрование не имеет первостепенного значения в данном случае, поэтому можно использовать простой шифр замещения для кодирования символов в риплетах ДНК (к примеру: ААА – А, ААГ – Б, ААЦ – В, ААТ – Г и т.д.). Поскольку человеческий геном содержит миллиарды нуклеотидных пар, фрагментированная и денатурированная ДНК человека обеспечивает благоприятную область для сокрытия секретного сообщения, позволит скрывать еще и среду, содержащую сообщение, от противника. Для получателя это не станет проблемой – зная последовательность праймеров ПЦР ДНК и ключ шифрования, можно легко провести амплификацию ДНК, а после считать нужное сообщение.

Закодированное сообщение может быть восстановлено только предполагаемым получателем, который, во-первых, знает, где искать необходимую метку, а во-вторых, знает последовательности праймеров ПЦР, являющиеся ключами к процедуре считывания. Для считывания получатель использует имеющиеся у него ключи ПЦР для инициирования реакции – высокочувствительном базовом методе в молекулярной биологии. Он приводит к производству экспоненциальных копий молекулы ДНК закодированного сообщения, позволяя обнаружить нужную молекулу и затем считать информацию с помощью анализа последовательности ДНК.

Даже если противник каким-то образом обнаружил образец, ему будет чрезвычайно трудно прочитать сообщение, не зная конкретных последовательностей в праймерах ПЦР. Попытки амплификации ДНК или клонирования образца также не увенчаются успехом, ведь задача подобрать нужные праймеры практически

невыполнима. Если после ПЦР ДНК увеличилась на ограниченное число геномных последовательностей, ключ шифрования покажет, какой продукт ПЦР декодирует нужное сообщение. Этот метод позволяет использовать клоны одной метки для отправки индивидуальных сообщений разным получателям, имеющим индивидуальный набор праймеров.

ДНК-метка используется для маркировки аутентификации важных изделий. По своей природе ДНК-молекула может быть добавлена в любые другие материалы, в зависимости от способа применения. ДНК, когда она изолирована и восстанавливается в лаборатории, представляет собой белое (фактически бесцветное) твердое вещество. Оно водорастворим, поэтому очень удобно добавлять ДНК-молекулу в различные жидкие материалы печати (чернила, струйный принтер). ДНК является чрезвычайно стабильной и долговечной молекулой и поэтому идеально подходит для использования в качестве метки безопасности. ДНК может храниться неизменной в течение миллиона лет, а также не подвержена воздействию экстремальных климатических условий. ДНК-метка может быть размещена под какой-либо печатью, не имея явных признаков своего присутствия и обеспечивая стабильную и эффективную процедуру считывания. В случае использования ее в совокупности с чернилами вопрос долговечности такой ДНК-метки определяется долговечностью таких чернил. Чтение, или проверка ДНК – это лабораторный процесс, начинающийся с полимеразной цепной реакции, которая производит амплификацию ДНК и помогает идентифицировать определенную последовательность среди огромного количества других последовательностей ДНК. Путем разбавления образца правильными ключами праймера и с использованием множества циклов ПЦР, секретный код ДНК поступает из зашумленной области в основную последовательность. Для процедуры проверки используются флуоресцентные сигналы (например, с помощью звукового дисембратора), процесс считывания занимает долгое время и требует дорогостоящего оборудования, однако данный способ маркировки не является открытым, а значит моментальное считывание на данном этапе невозможно. Перспективными выглядят разработки, связанные с ДНК-чипами, однако дороговизна таких чипов и оборудования для работы еще очень высока.

ДНК-метки используются как инструмент против подделки, в качестве идентификаторов в сфере контроля доступа и аутентификации продукции. ДНК-чернила могут быть добавлены на любые изделия под специальной биркой или просто нанесены поверх этикетки. Перспективы данной технологии уникальны, ведь этот метод дает самый надежный, долговечный и скрытный

способ маркировки продукции. Возможности использования ДНК-меток для нанесения на аппаратные изделия настолько широки, что, при должной работе в этом направлении, подобные метки могут вытеснить иные методы маркировки.

Главные плюсы ДНК-меток в сравнении с другими маркировками – высокая скрытность нанесения, потому что молекулы ДНК можно внедрить в любой материал при помощи специального оборудования. ДНК-чернила можно использовать в малом объеме в месте, которое известно только отправителю и получателю. Долговечность такой метки зависит только от долговечности материала, в который добавлена ДНК-молекула, сама она может существовать без изменения миллионы лет.

Уровень защиты от несанкционированного доступа или подделки очень высок, так как взломать ДНК-код можно только зная секретные праймеры ПЦР, иначе это сделать практически невозможно. Защита от несанкционированного уничтожения также зависит от материала самой метки, в которую добавлена ДНК-молекула, однако, в случае нанесения ДНК-метки на само изделие, ее уничтожение возможно только совместно с уничтожением самого изделия. Объем кодируемой информации очень велик, так как можно искусственно создавать ДНК практически любого размера и количества триплетов оснований в нем.

Основные минусы – сложность считывания и записывания так как необходимо работать в

лаборатории и использовать сложное медицинское оборудование. Отсюда вытекают два других минуса – время нанесения и считывания, а также стоимость такой метки, ввиду большой стоимости оборудования она является чересчур высокой.

Однако технологии развиваются, вопрос применения ДНК-молекул в мире стоит очень остро в связи с большими открытиями в медицине в этой области. ДНК-метки уже используются в сфере раскрытия преступлений – в особенно важных и охраняемых помещениях использующие специальные распылители ДНК-молекул. Они оседают на одежде, обуви, волосах и коже и в будущем могут быть идентифицированы на людях, находившихся в определенном помещении в момент кражи или взлома, тем самым ДНК-метки помогают раскрывать преступления. Области применения данной технологии очень обширны, а значит, в будущем стоит ожидать решения основных проблем ДНК-меток и их широкое распространение.

#### Литература

1. James D. Watson. DNA: The Secret of Life.- Arrow Books, 2014. – 512 p.
2. Inventor: Bancroft Frank Carter, Clelland Catherine. DNA-based steganography, United States patent US US631211 B1 – 2001.11.06.
3. Маерле А.В., Сергеев И.В., Алексеев Л.П. Метод иммуно-ПЦР: перспективы использования// Иммунология. – 2014. – №1. – С. 44-48.

УДК 621.382.2/3

### ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

Скопцов А.М., Врабий Э.М., Баранов В.В., Шахлевич Г.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Процесс производства полупроводниковых изделий состоит из множества технологических этапов, по которым следует партия полупроводниковых пластин. По завершению различных процессов (снятие фоторезиста, травление и др.) пластины подвергаются химической обработке для финишной очистки поверхности от различных загрязнений и подготовке к дальнейшим технологическим этапам (обработка в диффузионных печах, легирование, покрытие эпитаксиальными слоями, нанесение пленочных покрытий) [1, 2]. Особое значение имеют процессы финишной обработки при изготовлении приборов типа диодов Шоттки, где качество поверхности играет принципиальную роль для достижения таких параметров, как величина обратных токов и временная стабильность. Также химическая обработка проводится при производстве структур без

осуществления подготовительных операций, например, при подготовке пластин к сращиванию при изготовлении структур кремний-диэлектрик-кремний [2].

В значительной мере на процесс производства интегральных микросхем влияют этапы химической обработки полупроводниковых пластин. Результаты очистки пластин оказывают большое влияние на качество различных структур и микроэлектронных изделий на их основе в целом [3]. Уровень очистки напрямую влияет на качество продукции, в связи с чем производители микроэлектронных компонентов принимают меры повышения степени очистки [4].

По результатам очистки поверхности полупроводниковых пластин проводится анализ степени чистоты от различных загрязнений (механические частицы, органические примеси и др.).

Органическое и неорганическое происхождение загрязнений на поверхности кремниевых пластин позволяет провести разделение по типу на жидкие и твердые пленки, частицы. Элементы фоторезиста, различные виды смазок и масел, применяемые в технологическом процессе, формируют органические загрязнения.

Образовывая соединения между собой, загрязнения также могут присутствовать в виде молекул, ионов, атомов и др. Атомные загрязнения представляют собой металлические покрытия или частицы, например, электрохимически осажденные пленки металлов (золото, медь, серебро и др.); частицы материала (кремний, никель, железо и др.). Загрязнения, состоящие из ионов, включают в себя анионы или катионы из химических растворов неорганического происхождения, например,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Li}$  и др.

Посторонние примеси на пластинах можно разделить по типу физического и химического взаимодействия с поверхностью. Механико-физические примеси (пылинки, металлические частицы, абразив, волокна, элементы органики и др.) физически адсорбируют с поверхностью. Химические загрязнения более опасны, так как для их удаления с поверхности необходимо более высокий уровень энергии из-за сил хемосорбции, связывающих их с пластиной. Окислы, пленки сульфидов, атомы металлов являются характерными примерами данных загрязнений.

Различают несколько методов удаления загрязнений с поверхности кремниевых пластин с использованием различных растворов. Одним из них является метод очистки с помощью реактива Каро и водного раствора перекиси водорода с аммиаком (ПАР). Данные реактивы очищают поверхность пластины от механических, атомарных, органических и других загрязнений с последующей отмывкой [4]. Из негативных сторон использования данного метода можно выделить недостаточное удаление загрязнений с поверхности пластины, длительность процесса и высокую энергоёмкость.



Рисунок 1 – Общий вид экспериментального образца с ванной и кассетой для пластин

Полная очистка поверхности кремниевой пластины от органических, механических и химических примесей является основным

ожидаемым результатом. Также желательно снижение временных затрат на процесс обработки пластин.

На рисунке ниже представлен экспериментальный образец для финишной обработки кремниевых пластин, находящихся в кассете из высокоплотного полиэтилена, который отличается повышенной энергоэффективностью за счет использования ламп инфракрасного (ИК) нагрева и термостатирования.

Кассета обладает емкостью в 25 пластин с диаметром  $D = 100$  мм. Снижение энергопотребления достигается за счет использования инфракрасных ламп нагрева реактива, что позволяет сократить время нагрева на 15 % по сравнению с другими образцами.

Требования, предъявляемые к чистоте поверхности, определяются исходя из технического задания заказчика.

Достижение результата обусловлено применением двух фаз отмывки в разных ваннах с различными растворами. Первая ванна содержит раствор серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и перекиси водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) с температурой  $120$  °С, при этом смесь имеет следующие пропорции:



Раствор, содержащий в во второй ванне, состоит из аммиака ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), перекиси водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) и деионизованной воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) в соотношении:  $\text{H}_2\text{O} : \text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 = 19 : 1 : 4$  при температуре  $T = 75 \pm 5$  °С.

Оценка чистоты поверхности осуществляется под микроскопом (под сфокусированным лучом) на наличие оставшихся пылинок. Суть метода заключается в полном удалении загрязнений органического и механического происхождения с поверхности кремниевых пластин. В первой фазе удаляются самые крупные жировые загрязнения, включая различную органику. Во второй фазе смываются загрязняющие покрытия, оставшиеся после первой обработки.

Описанный метод состоит в том, что очистка в кислотных растворах ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) позволяет смыть адсорбированные ионы металлов и растворить пленки оксидов на поверхности полупроводниковых пластин, а перекись водорода разлагается с выделением атомов кислорода:  $\text{H}_2\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ , где кислород вступает в реакцию окисления с органическими и неорганическими примесями. Щелочной компонент ускоряет разложение перекиси водорода и связывает в хорошо растворимые сложные соединения.

Данный способ позволяет обработать поверхность кремниевых пластин с высокой чистотой и сократить временные затраты.

#### Литература

1. Суворов А.Л., Чаплыгин Ю.А., Тимошенко С.П., Графутин В.И., Залужный А.Г., Калугин В.В., Дьячков С.А., Прокопьев Е.П., Реутов В.Ф.,

- Шарков Б.Ю. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологий производства структур КНИ // Препринт ИТЭФ 27-00. 2000. – 51 с.
2. Tong Q.-Y., Gosel M. Wafer bonding and layer splitting for microsystems // Adv. Mater. – 1999. – V. 11, No 17. – P. 1409–1425.
3. Sievert W. New standards improve chemistry

- between device makers, suppliers // Semiconductor magazine. – 2000. – V. 1, iss. 3. – P.30–34.
4. Микитась Н.К., Минкин М.Л., Сухопаров А.И. Организационно технические аспекты создания производства СБИС уровня технологии 0,8–1,2 мкм на кремниевых пластинах диаметром 150 мм // Труды Proceeding 2А. – 1997.– Вып. 2.

УДК 621.923.74:553.8

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ ТОНКОГО ШЛИФОВАНИЯ ШАРОВ ИЗ СТЕКЛА И ЦВЕТНОГО КАМНЯ

Щегникович К.Г., Еромин Е.С., Лешкевич Е.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Шлифование шаров из неметаллических материалов ведется на специальных станках приводными кольцевыми кругами, оси которых пересекаются в центре шара [1]. Крупные шары шлифуются одновременно тремя кольцевыми кругами, вращающимися с переменными угловыми скоростями [2]. Ось вращения шара случайным образом меняет свое положение в пространстве, что обеспечивает обработку всей сферической поверхности шара. Специальные станки для шлифования шаров имеют ограниченное применение, поэтому представляет интерес использование для этих целей серийных шлифовально-полировальных или полировально-доводочных станков, широко распространенных в оптическом производстве.

На кафедре «Конструирование и производство приборов» ведутся работы по модернизации шлифовально-полировального станка модели ЗШП-350М с целью использования его для тонкого шлифования шаров из стекла и цветного камня. Авторами предложена конструкция приспособления, устанавливаемого на штангу станка и позволяющего одновременно шлифовать два шара.

За счет дополнительного вращения шара меняется положение его мгновенной оси вращения, и важно обеспечить, чтобы след от контакта с кольцевым инструментом как можно быстрее покрыл всю сферическую поверхность. Анализ кинематики показывает, что закономерное изменение положения оси вращения шара возможно при согласовании частоты возвратно-вращательного движения штанги с частотой вращения шара вокруг оси  $\bar{n}$ .

В состав приспособления (рисунок 1) входит горизонтальная планка 1, установленная с возможностью поворота вокруг оси штанги 2 и два кронштейна 5. Кольцевой инструмент 6 закреплен в кронштейне и торцевой поверхностью опирается на обрабатываемые шары. На планшайбу 9 наклеено эластичное покрытие 8 с большим коэффициентом трения о материал шара. Перемещение планки ограничивает сухарь 2, в

который завинчены два винта 4 с зазором в отверстии планки.

Нагрузка на обрабатываемые шары устанавливается с помощью регулируемого усилия прижима штанги, которое равномерно распределяется двумя шарами. Кольцевой инструмент закреплен в приспособлении с наклоном навстречу вектору линейной скорости вращения планшайбы в точке контакта с шаром. Наклонное положение торцевой кромки инструмента исключает его подрыв из-за колебаний в технологической системе. Расстояние между центрами шаров регулируется перемещением кронштейнов по планке в горизонтальном направлении.

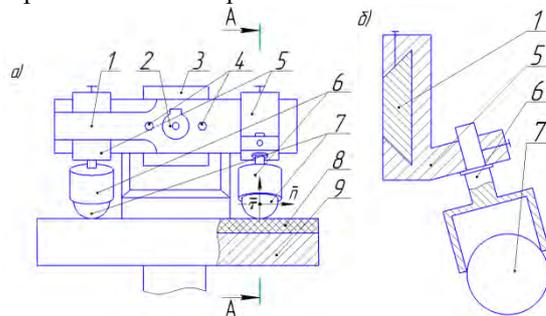


Рисунок 1 Схема установки приспособления на шлифовально-полировальном станке

После установки шаров на станок и выбора требуемого усилия прижима инструмента включается привод вращения планшайбы и привод возвратно-качательного движения штанги. При шлифовании свободным абразивом в зону обработки подается суспензия шлифовального порошка. Сила трения заготовки о эластичное покрытие больше силы трения о кольцевой инструмент, поэтому шар скользит по торцевой поверхности последнего со скоростью близкой к линейной скорости планшайбы. Сложное движение шара сопровождается вращением вокруг нормали  $\bar{n}$  и касательной  $\bar{\tau}$ . Вращение шара вокруг оси  $\bar{\tau}$  переменное по величине и направлению, что достаточно для переориентировки шара.

На станке ЗШП-350М частота вращения нижнего шпинделя и привод качательного движения верхнего узла имеют ступенчатую регулировку, поэтому один из способов согласовать движение инструмента и заготовок – регулировка среднего радиуса траектории контакта шара с планшайбой. Длина этой траектории определяет частоту вращения заготовки вокруг оси  $\bar{y}$ . Изменение частоты вращения шара при выбранной частоте вращения планшайбы достигается изменением расстояния от оси штанги до центра шара путем перемещения и закрепления в нужном положении кронштейна с кольцевым инструментом.

При небольших амплитудах возвратно-качательного движения штанги за траекторию контакта заготовки с планшайбой в первом приближении можно принять окружность средним радиусом, равным расстоянию между центрами шаров. Аналитический расчет частоты вращения шара ведется при указанном допущении с учетом проскальзывания заготовки относительно нижней планшайбы с эластичным покрытием.

Правильность выбора расстояния между заготовками проверяется расположением следов от

контакта с инструментом. Для этого заготовка покрывается красящим веществом и после нескольких оборотов нижней планшайбы шар извлекается из зоны обработки и изучаются следы на его поверхности. По величине смещения следов от первоначального положения вносятся коррективы в установленное ранее расстояние между шарами.

Разработанное приспособление может быть установлено на любой станок, работающий способом свободного притира. Это позволяет использовать универсальное оборудование для механизации трудоёмкой операции шлифования шаров из стекла, минералов и других хрупких неметаллических материалов.

#### Литература

1. Синкескес Дж. Руководство по обработке драгоценных камней: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 423 с.
2. Хрульков В.А., Головань А.Я., Федотов А.И. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.

УДК 621.315.592

### ЭПР ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ В ПЛЕНКАХ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ФОСФОРА И СУРЬМЫ

Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Олешкевич А.Н.<sup>1</sup>, Карпович В.А.<sup>2</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>,  
Сернов С.П.<sup>3</sup>, Лапчук Т.М.<sup>1</sup>, Лапчук Н.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Одним из фундаментальных направлений в изучении электризации космической аппаратуры (КА) является создание новых материалов для элементной базы бортовой аппаратуры, в частности материалов для электронных печатных плат. Эти материалы должны обладать оптимальной величиной темновой электропроводности. Это означает, что, с одной стороны, материал печатной платы должен оставаться диэлектриком, не допускающим значительных паразитных токов утечки, а с другой стороны, электропроводность этого материала должна быть достаточной для быстрой релаксации объёмных зарядов и исключения пробойных явлений [1].

Ионная имплантация полимеров представляет один из эффективных способов создания проводящих слоев в диэлектрической матрице, поскольку эффективность проявления электрофизических, оптических и структурных свойств будет зависеть от условий имплантации (вида ионов, энергии, дозы и плотности тока), что позволит выбирать оптимальный режим модификации материала [2]. Целью работы было

исследовать изменение парамагнитных свойств, а также изменение сопротивления образцов в СВЧ диапазоне пленок полиэтилентерефталата в зависимости от дозы имплантации ионов фосфора и сурьмы.

Объектом исследования были пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ)  $(C_{16}H_8O_4)_n$  толщиной 50 мкм, исходные и имплантированные ионами фосфора и сурьмы с энергией 60 кэВ в диапазоне доз 100–2000 мкКл/см<sup>2</sup>. Выбор параметров имплантации и вида ионов определялся, главным образом, использованием разработанных технологических операций для интегральной схемотехники. Образцы вырезались из облученного полимера в форме прямоугольника с размерами 3×8 мм<sup>2</sup>. Во время регистрации сигнала ЭПР образец располагался в центре резонатора  $H_{102}$  параллельно  $H_1$  компоненте СВЧ поля. Плоскость образца ориентировалась перпендикулярно направлению поляризуемого магнитного поля.

Спектры ЭПР имплантированных пленок регистрировались на спектрометре «RadioPan SE/X-2543» с резонатором  $H_{102}$  в X-диапазоне при

комнатной температуре. Максимальная мощность сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в резонаторе – 200 мВт. Частота СВЧ излучения ~ 9,3 ГГц в резонаторе контролировалась частотомером, поляризующее магнитное поле – датчиком ядерного магнитного резонанса. Для контроля добротности измерительного резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки магнитной компоненты СВЧ излучения использовался кристалл рубина, закрепленный на стенке резонатора. Чувствительность спектрометра составляла  $3 \times 10^{12}$  спин/мТл.

В исходной пленке, а также в пленке ПЭТФ, облученной ионами фосфора с дозой 100 мкКл, сигнал ЭПР не был обнаружен. Начиная с дозы 200 мкКл, в спектре ЭПР облученных пленок появляется одиночная линия, параметры которой меняются в зависимости от дозы облучения. Изменение омических потерь в резонаторе при внесении в него исследуемых образцов ПЭТФ контролировалось косвенно по изменению амплитуды эталонного образца рубина, наклеенного на стенку резонатора. Считается, что проводимость пропорциональна СВЧ потерям в образце.

На рисунке 1 приведена зависимость амплитуды сигнала ЭПР от дозы имплантируемых ионов фосфора.

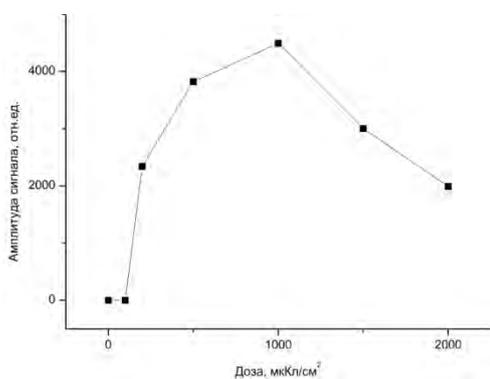


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды сигнала ЭПР образца от дозы облучения ионами фосфора пленок ПЭТФ

Как видно из рисунка, максимальное число свободных радикалов наблюдается в имплантированной пленке с дозой 1000 мкКл. При последующем увеличении дозы число парамагнитных центров в имплантируемых фосфором пленках уменьшается. Это может происходить за счет пассивации разорванных связей газообразующими элементами, возникающими в пленке вследствие деструктивных процессов.

На рисунке 2 приведена зависимость фактора спектроскопического расщепления сигнала ЭПР от дозы облучения ионами фосфора пленок ПЭТФ. Величина g-фактора с ростом дозы увеличивается, но остается в пределах, характерных для

аморфных углеродных систем с разорванными С-С связями.

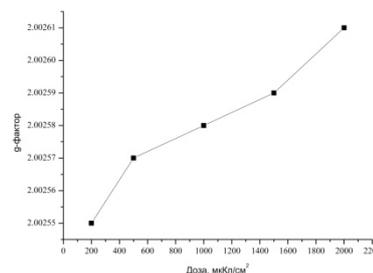


Рисунок 2 – Зависимость g-фактора сигнала ЭПР от дозы облучения ионами фосфора пленок ПЭТФ

Максимальные активные потери в резонаторе, свидетельствующие о проводимости разупорядоченного слоя в ПЭТФ, образованного имплантированными ионами фосфора, наблюдаются при дозе 200 мкКл. При этом наблюдается резкое уменьшение резонансной частоты (рисунок 3), вызванное локальным СВЧ разогревом проводящей прослойки в полимерной пленке.

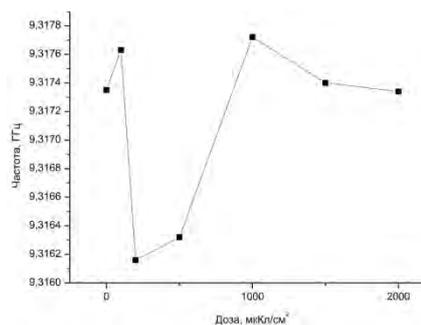


Рисунок 3 – Зависимость резонансной частоты сигнала ЭПР от дозы облучения ионами фосфора пленок ПЭТФ

Увеличение дозы имплантируемых ионов фосфора приводит к восстановлению резонансной частоты, что согласуется с уменьшением при этом числа разорванных связей в ПЭТФ.

Особенности имплантации ионов сурьмы в пленки ПЭТФ по результатам исследований методом ЭПР состоят в следующем:

а) Сигналы поглощения наблюдались только при первых двух дозах – 100 и 200 мкКл. На рисунках 4 а и 4 б приведены спектры ЭПР, наблюдаемые в полимерных пленках, облученных ионами сурьмы с энергией 60 кэВ и дозами 100 и 200 мкКл соответственно. Причем с увеличением дозы имплантации ионов до 200 мкКл амплитуда сигнала уменьшилась почти в четыре раза. Амплитуда эталона рубина так же уменьшилась, что свидетельствует об уменьшении добротности резонатора и увеличении активных потерь в резонаторе, вызванных образованием проводящей фазы в диэлектрической матрице.

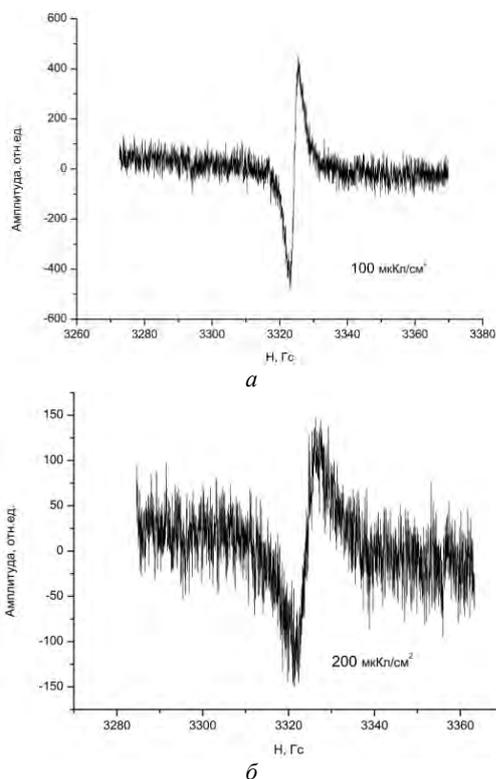


Рисунок 4 – Спектры ЭПР облученной ионами сурьмы с энергией 60 кэВ и дозой 100 мкКл (а) и дозой 200 мкКл (б) пленки ПЭТФ

б) При увеличении дозы с 500 мкКл до 2000 мкКл сигналов поглощения в спектрах ЭПР не наблюдалось. Впервые было обнаружено, что значение амплитуды рубина при этом оказалось выше, чем в не нагруженном (т.е. пустом) резонаторе, в то время, когда облученный образец был в резонаторе.

Отсутствие активных потерь в резонаторе, обусловленное проводимостью имплантированного слоя, а также отсутствие разогрева образцов в СВЧ поле обусловлено, возможно, меньшим поглощением СВЧ мощности из-за локализованного характера движения электронов внутри изолированных частиц сурьмы [3].

#### Литература

1. Пожидаев Е.Д., Саенко В.С. Смирнов И.А., Бабкин Г.В., Морозов Е.П., Гютнев А.О., Флоридов А.А., Доронин А.Н. Повышение стойкости космических аппаратов к воздействию поражающих факторов электризации // Космонавтика и ракетостроение. – 2003. – №1. – С. 32–35.
2. В.Б. Оджаев, И.П. Козлов, В.Н. Попок, Д.В. Свиридов. Ионная имплантация полимеров. – Минск, 1998.
3. Эпштейн Э.М. Амплитудный размерный эффект в монодисперсной полупроводниковой системе// ФТП. – 1983. – № 17. – С. 2190–2192.

УДК 621

### АЛГОРИТМ И МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕАНСА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Титович Е.В.<sup>1</sup>, Потепалов П.О.<sup>1</sup>, Петкевич М.Н.<sup>1</sup>, Киселев М.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность лучевой терапии являются временные параметры (время которое пациент проводит в процедурном помещении) сеанса облучения пациента, от которых напрямую зависит точность позиционирования пациента, а значит и точность доставки предписанного дозового распределения.

Цель работы – установление численных величин компонентов типового сеанса лучевой терапии для трех методик облучения, используемых для всех онкологических пациентов в РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова при проведении лучевого лечения, и разработка математической модели, позволяющей на основании полученных значений определить длительность сеанса облучения на этапе предлучевой подготовки и выбрать методику лучевой терапии с учетом индивидуальных

параметров сеанса облучения в каждом конкретном клиническом случае.

Авторами выявлены основные характеристики, влияющие на время лечения пациентов: скорость вращения штатива, скорость вращения коллиматора, скорость вращения терапевтического стола, количество мониторинговых единиц поля облучения, наличие дозимодулирующих устройств. Некоторые процессы могут выполняться одновременно, что было учтено при составлении алгоритма определения интегральной длительности сеанса облучения онкологического пациента, представленного на рисунке 1.

Время вращения штатива ускорителя определялось из формулы

$$T_{\text{gnt}} = L_{\text{gnt}} / V_{\text{gnt}},$$

где  $T_{\text{гнт}}$  - время, затраченное на поворот штатива  $L_{\text{гнт}}$  - угол поворота штатива,  $V_{\text{гнт}}$  - скорость вращения штатива.

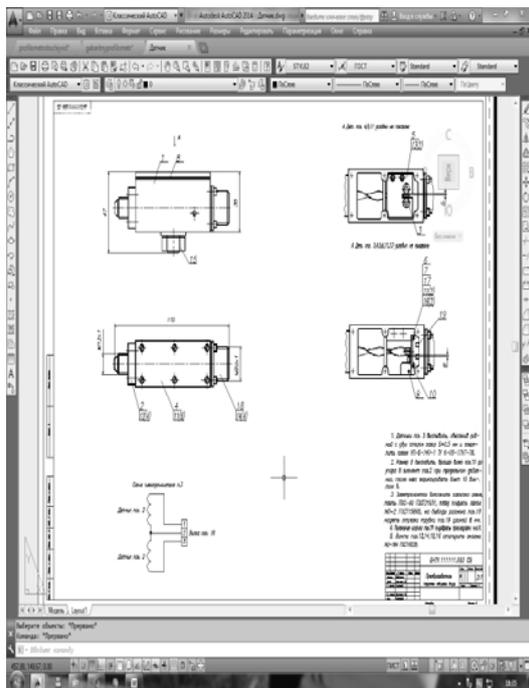


Рисунок 1. Алгоритм определения интегральной длительности сеанса облучения онкологического пациента

Время вращения коллиматора ускорителя определялось из формулы:

$T_{\text{col}} = L_{\text{col}} / V_{\text{col}}$ , где:  $T_{\text{col}}$  - время, затраченное на поворот коллиматора,  $L_{\text{col}}$  - угол поворота коллиматора,  $V_{\text{col}}$  - скорость вращения коллиматора;  $T_{\text{общ}}$  - общее время сеанса облучения;  $T_i$  - время облучения отдельного радиационного поля;  $MU_i$  - количество monitorных единиц;  $T_{\text{col}}$  - время потраченное на вращение коллиматора;  $V_{\text{MU}}$  - monitorных единиц в секунду;  $T_{\text{мед}}$  - время нахождения персонала в процедурном помещении;  $L_{\text{сч}}$  - угол поворота

терапевтического стола;  $V_{\text{сч}}$  - градусов в секунду;  $t_{\text{клин}}$  - время, затрачиваемое на смену клиновидного фильтра;  $t_{\text{см.и.}}$  - время, затрачиваемое на смену изоцентра облучения.

На основании полученного авторами алгоритма определения интегральной длительности сеанса облучения онкологического пациента была разработана математическую модель, позволившая проводить вычисление общего времени, затрачиваемого на проведение сеанса лучевой терапии онкологического пациента и учесть эту величину при определении параметров планов облучения пациентов, получающих лучевое лечение с использованием линейных ускорителей электронов в РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова.

$$T_{\text{общ}} = \sum T_i;$$

$$T_i = MU_i * K_{\text{MU}} + T_z + T_{\text{мед}} + \angle_{\text{счи}} / V_{\text{сч}} + T_{\text{клин}} + T_{\text{см.и.}}$$

Внедрение в клиническую практику РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова разработанной модели позволит учесть временные параметры сеанса облучения онкологического пациента, что позволит оптимизировать процесс дозиметрического планирования параметров лечения и повысить качество проводимых процедур лучевой терапии.

#### Литература

1. Тарутин. И.Г. Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии / И. Г. Тарутин, Е.В. Титович. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 175 с.
2. Алгоритмы диагностики и лечения злокачественных новообразований: сб. науч. ст. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь, Респ. науч.-практ. центр онкологии и мед. радиологии им. Н. Н. Александрова; под ред. О. Г. Суконко, С. А. Красного. – Минск: Профессиональные издания, 2012. – Вып. 2. – 508 с.
3. Лучевая терапия: учебник / Г. Е. Труфанов [и др.]; под ред. Г. Е. Труфанова. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2012. – 208 с.

УДК 666.766:[666.321+614.842.615]

### ТЕПЛО- И ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЖАРОТУШЕНИЯ, ПОТЕРЯВШИХ СВОИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Попов Р.Ю.<sup>1</sup>, Богдан Е.О.<sup>1</sup>, Белугин Д.С.<sup>1</sup>, Колонтаева Т.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Тепло- и звукоизоляция играет важную роль в жизни человека – это изоляция тепловых агрегатов, зданий, сооружений, утепление различных узлов и коммуникаций теплотехнического оборудования и т.д. Теплоизолирующие материалы, применяющиеся в промышленности строительных материалов, позволяют экономить от 20 до 70 % топлива, при

этом осуществляется снижение перепада температур в тепловых агрегатах, уменьшение толщины ограждающих конструкций, существенно ускоряется процесс обжига, а также качество обжигаемых изделий.

Использование звукоизолирующих материалов обеспечивает защиту помещений от проникновения в них излишних шумов от внешних

источников, оборудования и т. д., обеспечивая комфортные условия труда и отдыха людей. Частично звук задерживается и рассеивается внутри пористого материала, а часть его отражается от поверхности и уходит обратно во внешнюю среду. Создание пористой текстуры возможно при применении нескольких технологий. В керамической отрасли традиционно применяют несколько методов поризации структуры: введение выгорающих добавок, в качестве которых выступают органические компоненты – опилки, торф, уголь, сгорающие при синтезе, образуя поры; использование пенообразования (с применением различных пен) или химического газообразования (металлический алюминий с кислотами или щелочами). Анализ литературных данных показывает, что применение шликерной технологии с использованием пенообразователей позволяет получать изделия, характеризующиеся высокой пористостью (до 85 %) и равномерной ячеистой структурой, что обеспечивает высокие теплоизоляционные свойства конструкций.

В качестве пенообразователей традиционно применяют поверхностно-активные продукты нефтепереработки и нефтехимического синтеза, а также природные органические вещества (например, канифольное мыло, сапонин), способные образовывать устойчивые во времени пены. Такую же функцию могут выполнять и пенообразователи для пожаротушения с истекшим сроком годности и подлежащий утилизации.

Согласно данным Научно-исследовательского института пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций, ежегодно в Республике Беларусь образуется порядка 70–100 т пенообразователей с истекшим сроком годности, которые подлежат утилизации.

Следует отметить, что невостребованные в течение установленного срока годности указанные пенообразователи для тушения пожаров сохраняют вполне приемлемые пенообразующие свойства и могут представлять интерес для получения пористой керамики.

В связи с этим, исследования в области получения эффективных теплоизоляционных материалов и изделий на основе глинистого сырья Республики Беларусь и пенообразователей для пожаротушения с истекшим сроком годности являются актуальными, поскольку направлены на импортозамещение, ресурсо- и энергосбережение.

Для получения теплоизоляционных материалов были разработаны 2 серии составов масс. Составы керамических масс 1-й серии включали следующие сырьевые компоненты: каолин месторождения «Дедовка» (Республика Беларусь), обогащенный мокрым способом, глина «Керамик-Веско» (Украина) и предварительно синтезированный алюмосиликатный шамот. Составы масс 2-й серии были разработаны на основе тугоплавкой глины

месторождения «Городок» (Республика Беларусь) и алюмосиликатного шамота.

Для создания ячеистой структуры материала использовался пенообразователь «Барьер-пенкообразующий» с истекшим сроком годности и подлежащий утилизации. Указанный пенообразователь представляет собой водный раствор поверхностно-активных веществ (ПАВ).

В связи с тем, что к пенам, применяемым для получения пористых изделий, предъявляются высокие требования в отношении их устойчивости во времени, кратности, дисперсности и прочности пленок, были проведены исследования утилизируемых пенообразователей и свойств пен, полученных на их основе.

Основные свойства пенообразователя и пены, полученной дисперсионным методом на приборе Росс-Майлса по стандартной методике при температуре  $293 \pm 2$  К, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные свойства пенообразователя и полученной пены

Наименование свойства	Значение
Поверхностное натяжение пенообразователя, мДж/м <sup>2</sup>	22–25
Водородный показатель	10,8–11,0
Плотность раствора ПАВ, кг/м <sup>3</sup>	1040–1070
Пенное число, мм	180–183
Кратность пены	9–10
Устойчивость пены, %	88–90
Скорость разрушения пены (в течение 5 мин), %/мин	2,5–3,0
Плотность пены, кг/м <sup>3</sup>	240–260

При исследовании структуры пены отмечается наличие газовых пузырьков в виде многогранников, отличающихся малым содержанием жидкой фазы и характеризуются высокой стабильностью (рисунк. 1).



Рисунок 1 – Форма ячеек пены ( $\times 10$ )

Проведенные исследования пенообразователя свидетельствуют о возможности его применения для получения тепло- и шумоизоляционных керамических материалов.

Для получения теплоизоляционных материалов по шликерной технологии суспензию готовили следующим образом. Предварительно подготовленные глинистые компоненты и алюмосиликат-

ный шамот смешивались в необходимых соотношениях, затем добавлялась вода до влажности шликера 40–50%. Суспензия тщательно перемешивалась до однородности с помощью миксера. Отдельно готовилась пена методом диспергирования пенообразователя «Барьер-пленкообразующий» в лабораторной мешалке, а затем вводилась в шликер.

Для стабилизации пеномассы использовали мездровый клей в количестве 20% (сверх 100%). Дополнительно в полученную суспензию вводили гипсовое вяжущее марки Г-5 в количестве 10–20%, а также портландцемент М400 – 15 (сверх 100%), добавление которых способствовали упрочнению отлитого полуфабриката и ускорению процессов сушки за счет активного поглощения влаги при гидратации.

Формование полуфабриката осуществлялось методом литья приготовленного шликера в специальные формы, с последующей сушкой и обжигом изделий в интервале температур 1200–1300°С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Синтезированные материалы, полученные на основе разработанных составов масс 1-ой и 2-ой серии, характеризовались следующими физико-техническими свойствами: водопоглощение 61,1–72,6%, кажущаяся плотность 640–880 кг/м<sup>3</sup>, пористость 41,4–79,12%, прочность при сжатии 1,35–2,74 МПа, коэффициент теплопроводности 0,2–0,36 Вт/(м·К).

Рентгенофазовый анализ, проведенный с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker (Германия), позволил установить, что фазовый состав синтезированных материалов представлен преимущественно муллитом ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), кварцем ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ) и кристобалитом ( $\text{SiO}_2$ ).

Результаты исследования микроструктуры синтезированных материалов, выполненного на сканирующем электронном микроскопе «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия), представлены на рисунке 2.

Анализ полученных микрофотографий

позволил установить, что материал обладает значительной пористостью. Равномерно распределенные по объему материала поры имеют изометричную форму и характеризуются средним размером 750 мкм. На поверхности изломов фиксируются кристаллические образования в виде призм продолговатой формы, которые, согласно габитусу кристалла, можно идентифицировать как муллит. Скопления кристаллов различной формы и размеров располагаются как на поверхности, так и во внутренних полостях пор и аналогичны для образцов всех исследуемых составов. Повышение температуры обжига от 1200 до 1300°С приводит к уменьшению размера пор, их внутренняя поверхность остекловывается с образованием раковистого излома. Образцы, обожженные при температуре 1300°С, характеризуются повышенным содержанием стекловидной фазы, наличием пор округлой замкнутой формы средним размером 6 мкм.

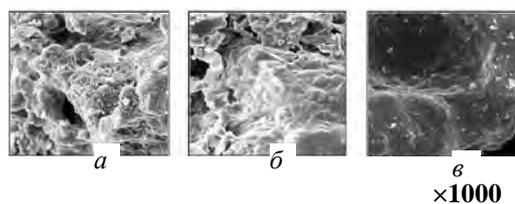


Рисунок 2 – ЭМ-изображение поверхности синтезированных материалов при температурах: а–1200 °С; б–1250 °С; в–1300 °С

Проведенные исследования показали целесообразность применения глинистого сырья Беларуси и утилизируемого пенообразователя «Барьер-пленкообразующий» для получения ячеистых теплоизоляционных керамических материалов, что позволит расширить сырьевую базу керамической отрасли, ассортимент выпускаемой продукции, решить проблемы импортозамещения, ресурсо- и энергосбережения, а также утилизации пенообразователей для пожаротушения с истекшим сроком годности.

УДК 536.46

### ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Попов Р.Ю.<sup>1</sup>, Мухлядо В.И.<sup>1</sup>, Варфоломеев В.С.<sup>1</sup>, Шамкалович В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

С развитием техники и технологии неуклонно возрастает потребность в материалах, способных демонстрировать высокие эксплуатационные характеристики в экстремальных условиях. Такие материалы, в зависимости от предъявляемых к ним требованиям, должны быть жаропрочными, износостойкими, химически инертными при

контакте с агрессивными средами и отвечать другим не менее важным свойствам. Однако получение тугоплавких и огнеупорных соединений и изделий из них по традиционной технологии сопряжено со значительными материальными затратами. Такие технологии основаны на медленном протекании химических процессов при высоких температурах.

Отличительной особенностью существующих способов является высокая энергоёмкость производства, большая длительность, многооперационность и трудоёмкость получения продукции. С разработкой в 1967 году процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) неорганических веществ и материалов технологического назначения получение данных соединений доступнее и легче. Сложилась новая теория этих процессов, названная структурной макрокинетикой. Открылись и новые практические применения горения для синтеза новых материалов. В машиностроении это абразивы, твердые сплавы и инструментальные материалы; в металлургии – огнеупорные составы и ферросплавы; в электротехнике – высокотемпературные керамические материалы; в медицине – новый класс имплантатов на основе сплавов, проявляющих так называемый эффект памяти формы. Сущность процессов СВС заключается в самопроизвольном распространении зоны химической реакции в средах, способных к выделению химической энергии с образованием ценных конденсированных продуктов. Процесс возникает при локальном воздействии на систему коротким тепловым импульсом и в дальнейшем протекает в виде волны горения без подвода энергии извне за счет собственного тепловыделения. В отличие от традиционных процессов спекания тугоплавких материалов в печах различных конструкций процессы СВС происходят за пренебрежимо малое время, требуют существенно меньших затрат энергии, отличаются практически безотходностью производства, высокими экологическими характеристиками. Это следует из факта почти полного протекания реакций, начиная от исходных компонентов и до конечных продуктов синтеза в конденсированной фазе без выделения вредных, химических токсичных газообразных продуктов реакции [1–4].

Также одним из важнейших преимуществ метода СВС являются то, что получение ценных продуктов в процессе горения способно дать материалы высокой чистоты, т.к. высокие температуры очищают порошки от любых энергезависимых адсорбированных или присутствующих в реагентах примесей. Аналогично положительным фактором является то, что высокие температурные градиенты, объединенные с быстрыми скоростями охлаждения в волне горения, могут формировать уникальные микроstructures, которые невозможно достигнуть традиционными методами порошковой металлургии. В качестве горючего в СВ-системах используются металлы (Ti, Ta, Al, Mg и др.), в качестве окислителя неметаллы (B, C, Si и др.).

В настоящей работе для приготовления масс использовались следующие сырьевые материалы: алюминиевая пудра марки ПАП-1 или ПАП-2 (ГОСТ 5494 – 95), оксид кремния в виде кварцевого песка Гомельского ГОКа марки С-070-2 (ГОСТ 22551 – 77), оксид железа (III), каолин месторождения «Дедовка» природный, глина «Лукомль» и натрий кремнефтористый (ГОСТ 87 – 77), электрокорунд (ГОСТ 28818 – 90), воластонит, отход глазурей ОАО «Керамин», жидкое стекло.

При нанесении состава в производственных условиях на рабочие поверхности футеровочной кладки любого действующего теплоагрегата создание защитно-упрочняющего слоя осуществляется с помощью пневмоинструментов или пульверизаторов. Необходимая консистенция (вязкость) состава в этих условиях создается разбавлением жидкого стекла (связки) водой.



× 100



× 1000

Рисунок 1 – Электронная микроскопия образца оптимального состава (вверху: 900 °С; внизу: 1000 °С)

Нанесенный таким образом защитный слой футеровки теплоагрегата сначала подвергается естественной сушке в течение суток до полного его отверждения, а затем в процессе обычного рабочего режима тепловой установки (в процессе нагрева) осуществляется запуск СВС-процесса в защитном слое с образованием в нем структур муллитового типа. Как уже указывалось выше, после прохождения СВС в защитном слое происходит спекание покрытия с основой за счет капиллярного проникновения жидкой фазы шихты в открытые поры и дефекты поверхности материала кладки. Все это надежно обеспечивает целостность покрытия без его отслоения от основы и растрескивания в течение многократных циклов высокотемпературного нагрева и охлаждения теплового агрегата. Благодаря нанесению защитных покрытий на рабочие поверхности футеровочной кладки из алюмосиликатных материалов ресурс работы теплоагрегата

увеличивается в несколько раз. В процессе исследований отмечалось, что наибольшая механическая прочность достигается в составах, в которых содержится отход глазури ОАО «Керамин», это объясняется тем, что в процессе синтеза, наряду с активным формированием стекловидной фазы (основу которой составляют оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), присутствуют огнеупорные компоненты, такие как:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , способствующие повышению указанной характеристики за счет особенностей своего строения, а также специфических свойств.

При рассмотрении фотографии поверхности образца, обожженного при  $900^\circ\text{C}$ , отчетливо видно, что большая часть оксида железа (III) перешла в расплав, который отчетливо выделяется на поверхности керамического покрытия. Можно наблюдать незначительное количество кварцевой составляющей – скопления кристаллов, наличие которых подтверждается данными РФА.

Исследование поверхности образца, обожженного при  $1000^\circ\text{C}$  свидетельствует, о том, что количество расплава в материале несколько увеличивается при повышении температуры, также отмечается, что содержание зерен кварца снижается, а его форма становится более округлой. Материал характеризуется однородной текстурой.

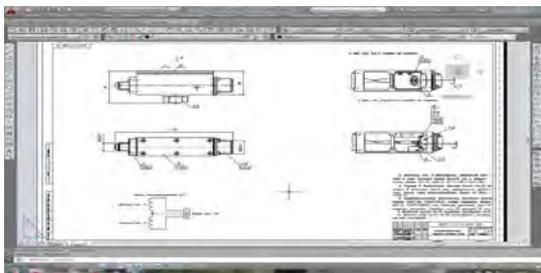


Рисунок 2 – Фазовый состав покрытий

Фазовый состав покрытий характеризуется наличием корунда,  $\alpha$ -кварца, кремния, периклаза. Кроме того, в некоторых составах образцов покрытий фиксировался муллит.

Образцы оптимального состава обладали следующими характеристиками: твердость по шкале Мооса – 8,5; прочность при сжатии – 71,09 МПа; водопоглощение – 24,49 %; открытая пористость – 34,66 %; ТКЛР –  $6,14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

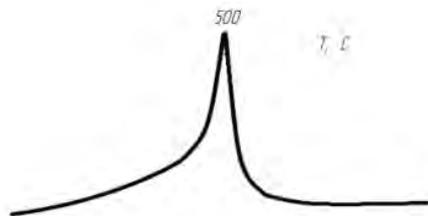


Рисунок 3 – Температура начала воспламенения защитного покрытия

Отмечается, что температура инициализации процесса самовоспламенения в оптимальном составе, согласно данным дифференциально-термического анализа, составляет  $500 - 510^\circ\text{C}$ .

1. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов. – Москва: Химия, 1983. – 144 с.
2. Петюшик, Е.Е. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / Е.Е. Петюшик, В.Е. Романенков, С.М. Ушеренко. – Минск: МИПК при БГПА, 2000. – 66 с.
3. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез туго-плавких неорганических соединений / А.Г. Мержанов, И.П. Боровинская. – М.: Химия, 1984. – 402 с.
4. Мержанов, А.Г. Концепция развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как области научно-технического прогресса / А.Г. Мержанов, А.М. Столин. – Москва: ИСМАН, 2003. – 367 с.

УДК 621.382

### ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРОВ ТЕПЛОвого СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ МОП ТРАНЗИСТОРОВ КП723 И КП7209 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРМОУДАРОВ

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Васьков О.С.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>1</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Соловьев Я.А.<sup>2</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл»

Минск, Республика Беларусь

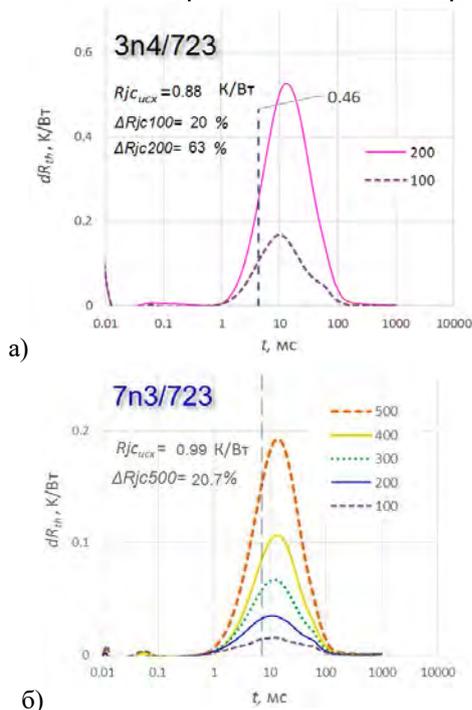
С использованием релаксационного импеданс-спектрометра [1] тепловых процессов проведены тепловые измерения двух партий экспериментальных мощных полевых транзисторов и КП723 (n-МОП) и КП7209 (p-МОП) в пластмассовом ТО220 и металлокерамическом ТО254 корпусах, соответственно. Транзисторы изготовлены с

использованием различных методов посадки кристаллов (на эвтектику AuSi и на припой ПОС-10 при разных температурах), а также с использованием термокомпенсаторов MD-40 и MD-50 для снижения термических напряжений в кристаллах транзисторов. Дegrадация теплового сопротивления транзисторов и его структуры исследовалась

при воздействии серии термоударов:  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  (5 минут),  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (10 минут). Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии (ТРДС) [2, 3] получены дифференциальные тепловые спектры транзисторов (зависимости динамического теплового сопротивления и производных высоких порядков от него от времени). На основе ТРДС спектров построены разностные спектры ТРДС, полученные вычитанием из спектров после термоударов спектров исходных образцов. Данная методика позволяет обнаружить малые изменения в структуре теплового сопротивления исследуемых транзисторов (до  $0,01\text{ К/Вт}$ ) [4].

В качестве примера на рисунке 1 приведены изменения при термоиспытаниях разностных спектров теплового сопротивления транзисторов КП723.

Установлено, что для всех исследованных образцов временное положение максимума разностных спектров находится в интервале 3–15 мс. Из анализа ТРДС спектров исследуемых транзисторов можно сделать вывод, что такой временной интервал соответствует слою посадки кристалла с различного типа дефектами (плоскими и объемными – кавернами и отслоениями припоя).



- а) без термокомпенсатора,  
б) с термокомпенсатором МД50.

Рисунок 1 – Разностные спектры транзисторов КП723/ТО254 с посадкой кристалла на припой после серий по 100 термоударов. Вертикальной линией представлены положение по шкале времени и величина теплового сопротивления слоя посадки в ТРДС спектре исходного образца

Анализ показывает, что после термоударов произошел монотонный рост внутреннего теплового сопротивления  $R_{jc}$ , обусловленный ростом теплового сопротивления слоя посадки, практически во всех исследованных транзисторах КП723 и КП7209. Определено, что в исследованных образцах экспериментальных транзисторов КП723 в корпусе ТО254, с посадкой кристалла на припой и термокомпенсатором МД50 произошли меньшие изменения (в среднем рост 35 % после 500 термоударов) теплового сопротивления при термоиспытаниях по сравнению с транзисторами КП7209 аналогичного конструктивного исполнения. Анализ профиля растекания тепла в кристаллах, исследованных образцов показывает, что транзисторы КП723 в отличие от КП7209 имеют существенно больший коэффициент заполнения кристалла (число электрически активных транзисторных ячеек) и, соответственно, большую величину активной площади  $S_a$  в поверхностном слое кристалла КП723. В зоне ближе к границе с припоем ( $t \approx 1\text{ мс}$ ) в кристаллах КП723 сечение теплового потока сужается из-за теплового барьера, возникающего на дефектах припоя.

Во всех исследованных транзисторах КП7209 в корпусе ТО254 после воздействия термоударов наблюдалась последовательная деградация теплового сопротивления. Наименьший рост 3–6 % после 600 термоударов зафиксирован в транзисторах КП7209 в корпусе ТО254 с термокомпенсатором МД50 с посадкой кристалла на эвтектику AuSi. В то же время подобные транзисторы, но с термокомпенсатором МД40, показали худшие результаты, как по уровню исходного теплового сопротивления, так и его роста. Образцы с термокомпенсатором выдержали без отказа 500–600, а без термокомпенсатора 100–200 термоударов.

Анализируя временное положение пика (время тепловой релаксации  $\tau_0$ ), соответствующего области посадки, исходных ТРДС спектров транзисторов (на рисунках 1а б вертикальные штриховые линии), можно оценить глубину залегания дефектов в слое припоя. Чем больше времени тепловой релаксации  $\tau_0$ , тем дальше от границы кристалл-припой находится дефект посадки. На рисунке 2 приведены данные для постоянных времени релаксации  $\tau_0$  спектров исследованных образцов.

Из рисунка видно, что только для образцов транзисторов с термокомпенсатором МД40 как с посадкой кристалла на припой, так и на эвтектику, время релаксации  $\tau_0$  составляет более 10 мс. Таким образом, в исходных образцах с термокомпенсатором МД40 доминируют глубокие дефекты в переходной области слоя посадки с термокомпенсатором, в остальных образцах, в том числе с термокомпенсатором МД50 – вблизи границы с кристаллом.

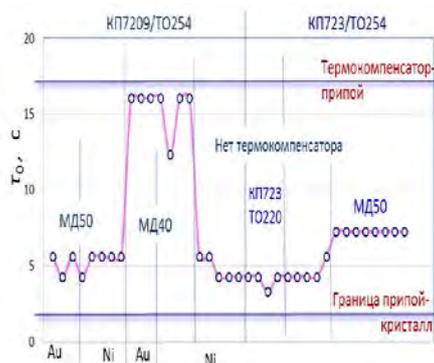


Рисунок 2 – Распределение времени релаксации ТРДС спектров в исходных исследуемых образцах

Необходимо также отметить, что использование разностных тепловых спектров после термоударов позволяет оценить эволюцию развития дефектов в слое посадки по сдвигу времени тепловой релаксации, соответствующего этому слою, и возрастанию амплитуды разностных спектров.

#### Литература

1. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай

[и др.] // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.

2. Нисс, В.С. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии / В.С. Нисс [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.

3. Zakgeim, A.L. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A.L. Zakgeim [et al.] // EuroSimE 2013: 14th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. – Wroclaw, 2013. – P. 1/7–7/7.

4. Бумай, Ю.А. Методика электротепловой спектрометрии для исследования малых изменений теплового сопротивления полупроводниковых приборов при термоиспытаниях / Ю.А. Бумай, О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В.С. Нисс, А.Ф. Керенцев, А.Н. Петлицкий, Я.А. Соловьев // Сборник трудов VII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники», посвященной 50-летию юбилею кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, Минск, 12–13 октября 2016 г. / Бел. гос. ун-т. – Минск: БГУ, 2016. – С. 34–37.

УДК 621.382

### АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ СЛОЯ ПОСАДКИ КРИСТАЛЛОВ В МОЩНЫХ МОП ТРАНЗИСТОРАХ ИЗ РАЗНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СПЕКТРОВ ПРИ ТЕРМОШОКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Васьков О.С.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>1</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Соловьев Я.А.<sup>2</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

При термоиспытаниях полупроводниковых приборов обычно наблюдаются небольшие изменения полного теплового сопротивления, в основном, из-за деградации слоя посадки кристаллов на теплоотводящее основание. В данной работе исследовалась деградация слоя посадки теплового сопротивления мощных транзисторов КП723 и КП7209 в металлокерамическом корпусе КТ-97В после серий термоударов (5 минут при -196°C, 10 минут 200 °C). Монтаж кристаллов транзисторов на корпус осуществлялся на припой ПОС-40. Конструкция корпуса КТ-97В может содержать термокомпенсатор (МД40 или МД50) для снижения термических напряжений в кристалле мощного транзистора.

Измерения и анализ проводились с использованием метода тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии (ТРДС) [1] с построением разностных тепловых спектров. Определялись внутреннее тепловое сопротивление транзисторов и его структура в виде непрерывных дифференциальных спектров исходного образца

(до термоиспытания)  $S_0$  и спектры  $S_T$  после каждого цикла по 100 термоударов. В соответствии с [1] ТРДС спектры первого порядка  $S_0$  и  $S_T$  могут быть представлены суммой производных от тепловых сопротивлений структурных элементов полупроводникового образца.

$$S_0 = \sum_i^n r_{i0} \frac{t}{\tau_{i0}} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{i0}}\right), \quad (1)$$

где  $r_{i0}$  и  $\tau_{i0}$  – слоевые тепловые сопротивления образца и постоянные времени тепловой релаксации образца до термоиспытаний.

$$S_T = \sum_i^n r_{iT} \frac{t}{\tau_{iT}} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{iT}}\right), \quad (2)$$

где  $r_{iT}$  и  $\tau_{iT}$  – после термоиспытаний.

Далее для каждого цикла термоиспытаний определяется разностный ТРДС спектр  $S_r = S_T - S_0$ . Поскольку не все тепловые компоненты образца при термоиспытаниях изменяются, разностный спектр  $S_r$  отражает часть спектра  $S_0$  с меняющейся амплитудой. В основном, как выявлено из эксперимента, при термоиспытаниях в транзисторах происходит тепловая деградация

слоя посадки кристалла, остальные компоненты теплового интерфейса образцов подвержены слабым изменениям, следовательно, разностном спектре  $S_r$  остаются компоненты, соответствующие тепловым параметрам слоя посадки до и после термоиспытаний.

$$S_r = r_T \frac{t}{\tau_T} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_T}\right) - r_0 \frac{t}{\tau_0} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right), \quad (3)$$

где  $r_0$  и  $\tau_0$  – тепловое сопротивление и постоянная времени тепловой релаксации слоя посадки образца до термоиспытаний и  $r_T$ ,  $\tau_T$  – после термоиспытаний.

Из эксперимента получено, что при термоиспытаниях, тепловая релаксация образцов соответствуют, в основном, двум вариантам разностных спектров.

1) Время тепловой релаксации после термообработки не изменяется  $\tau_T = \tau_0$ , т.е. отношения сопротивлений и теплоемкостей обратно пропорциональны –  $r_T/r_0 = c_0/c_T$ . В этом случае выражения для  $S_r$  принимает вид

$$S_r = (r_T - r_0) \frac{t}{\tau_0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_0} + 1\right), \quad (4)$$

то есть представляет кривую с максимумом, равным  $r_T - r_0$  в точке  $t = \tau_0$ .

Пример такого случая приведен на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что амплитуда максимума разностного спектра соответствует значению  $r_T - r_0$ , а временное положение  $\tau_T = \tau_0$ . Это характерно для разрастания объемных (трехмерных) дефектов в слое посадки кристалла.

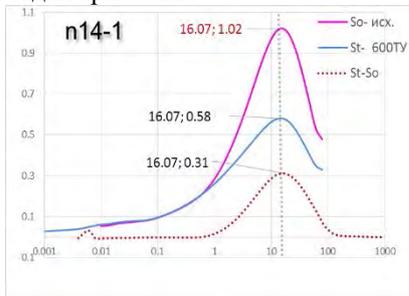


Рисунок 1 – Разностные тепловые спектры при термоиспытаниях транзистора КП7209 (образец n14-1)

2) Тепловое сопротивление и время тепловой релаксации при термообработке изменяются пропорционально т.е.  $r_T/r_0 = \tau_T/\tau_0$ , следовательно, при изменении теплового сопротивления в результате термоиспытаний, теплоемкость слоя не изменяется ( $c_T \approx c_0$ ). Это характерно для разрастания плоских (двумерных) дефектов слоя, например, для отслаивания припоя. В этом случае при  $\tau_T/\tau_0 < 2$ , можно показать, что формула (3) с погрешностью менее 1% может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$S_r = \frac{4}{e} (r_T - r_0) \left(\frac{t}{\tau_T + \tau_0}\right)^2 \exp\left(-\frac{2t}{\tau_T + \tau_0} + 2\right). \quad (4)$$

Пример такого случая приведен на рисунке 2, из которого видно, что для данного образца амплитуда максимума разностного спектра  $S_r$  близка к значению  $r_T - r_0$ , а временное положение – к  $\tau_T + \tau_0$ , что согласуется с выражением (5).

Анализ дефектов слоя посадки проведен с использованием моделей, соответствующих формулам (3, 4). Для идентификации механизмов тепловой релаксации в образцах введем в рассмотрение параметр  $\alpha$ , выбранный в виде отношения суммы времен релаксации спектров образцов до и после термообработки, соответственно, к времени релаксации разностного спектра  $\alpha = 1 + (\tau_0 + \tau_i)/\tau_T$ .

Исходя из определений моделей временной релаксации спектров в зависимостях (3, 4) время релаксации  $\tau_T$  разностных спектров находится в интервале:  $\tau_0 \leq \tau_T \leq \tau_0 + \tau_i$ . Соответственно, параметр  $\alpha$  может принимать значения в интервале  $2 \div 3$ . Значение  $\alpha = 2$ , при котором изменения сопротивлений и теплоемкостей обратно пропорциональны ( $r_T/r_0 = c_0/c_T$ ), соответствует двумерной модели дефекта, а  $\alpha = 3$  при котором теплоемкость не изменяется  $c_0 = c_T$ , – трехмерной соответственно.

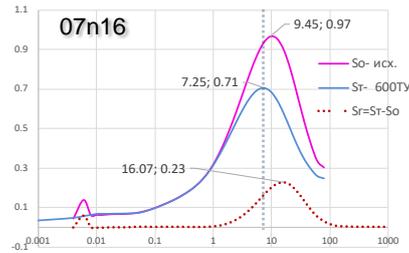


Рисунок 2 – Разностные тепловые спектры транзистора КП7209 (n19-1)

На рисунке 3 приведено распределение  $\alpha$ , используемое для идентификации дефектов при деградации теплового сопротивления мощных транзисторов КП723 и КП7209.

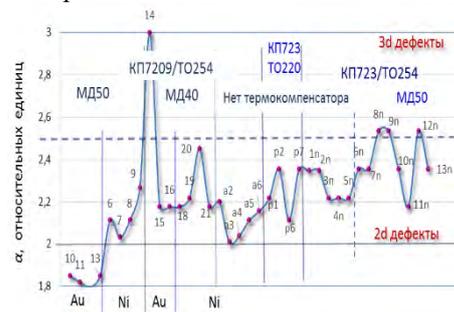


Рисунок 3 – Распределение параметра  $\alpha$  в исследуемых образцах

Из рисунка 3 видно, что в образце 14 доминирует рост при термообработке трехмерных дефектов, которые можно определить, как деградацию структуры припоя, в остальных образцах смешанный тип тепловой релаксации с преобладанием рассеяния на плоских дефектах которые можно идентифицировать как

отслаивание кристалла. В образцах группы КП7209/МД50/Au выявлен заниженный уровень  $\alpha < 2$ , что может быть связано погрешностью измерений, ввиду слабых изменений в  $R_{jc}$  (порядка 0.02K/Wt), для образцов этой группы.

УДК 621.371

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЙНИЯ ФАР

Алешкевич Н.Н.<sup>1</sup>, Будай А.Г.<sup>1</sup>, Кныш В.П.<sup>1</sup>, Малый С.В.<sup>2</sup>, Наумович Н.М.<sup>3</sup>, Юбка А.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко БГУ

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Антенна является неотъемлемой частью любой приемо-передающей системы, при проектировании которой необходимо учитывать окружающую электромагнитную обстановку. Антенна, подключенная к приемопередатчику, может, как пассивный рассеиватель, иметь эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) в десятки и сотни раз больше ее геометрической площади.

Характеристики согласования антенны со свободным пространством и приемно-измерительным трактом паспортизируются в рабочем диапазоне системы, а вне его они обычно неизвестны. ЭПР любой антенной системы, в том числе и фазированной антенной решетки (ФАР), состоит из двух составляющих. Одна, "антенная" составляющая, является следствием приема падающей на антенну электромагнитной волны и последующего ее переизлучения и зависит от коэффициента направленного действия антенны и ее согласования с приемным трактом. Вторая составляющая – чисто конструктивная, зависящая от механической конструкции антенны и используемых материалов. Знание этих характеристик необходимо при проектировании приемно-передающих систем с учетом условий электромагнитной совместимости. Определение же их зачастую проще осуществить экспериментально.

Для проведения экспериментальных исследований разработан специализированный измерительный комплекс, в состав которого входят: безэховая камера на основе широкополосного радиопоглощающего покрытия пирамидального типа «Универсал-1»; радиопоглощающие панели из радиопоглощающего покрытия ГОРА-39; слабоотражающая система пространственной фиксации исследуемых образцов; векторный анализатор Vector Star VS4642B; комплект антенн Пб-23В. Разработана методика проведения измерений образцов. Проведена оценка предельных размеров исследуемых объектов и диапазонов частот.

1. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии / В.С. Нисс [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.

Разработанный измерительный комплекс является универсальным и предназначен для проведения антенных измерений, а также анализа эффективной поверхности рассеяния произвольных метало-диэлектрических объектов. С использованием комплекса возможно проведение исследования конечных фрагментов радиопоглощающих покрытий, частотно-селективных и пространственно-поляризационных фильтров.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования ЭПР плоского фрагмента ФАР с размерами 40x9 см<sup>2</sup> (Рисунок 1). Здесь и далее для упрощения под термином ЭПР понимается максимальное значение моностатической ЭПР объекта.

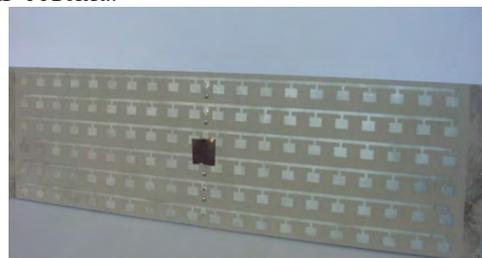


Рисунок 1 – Фрагмент фазированной антенной решетки

Измерение ЭПР антенны проводилось в диапазоне частот 2÷15ГГц.

Для калибровки и оценки точности измерений помимо фрагмента ФАР исследовались ЭПР дополнительных объектов. В качестве объектов исследования были использованы:

- 1) ФАР с согласованной нагрузкой;
- 2) ФАР с разомкнутыми выходами;
- 3) плоская металлическая пластина с площадью, равной площади поверхности ФАР;
- 4) металлический диск диаметром 200мм.

Так как для металлического диска известно точное решение задачи рассеяния, то используемая методика позволяет в результате измерений

определять ЭПР всех объектов в абсолютных единицах, например, в м<sup>2</sup>.

ЭПР диска радиуса  $a$  для электромагнитного излучения с длиной волны  $\lambda$  [1]:

$$\delta = 4\pi^3 \frac{a^4}{\lambda^2} U(\lambda, a) ,$$

где  $U(\lambda, \alpha)$  - энергетическая функция.

По относительным измерениям рассеяния диска и прямоугольной пластины определяется ЭПР последней.

Затем измеряются относительно ЭПР пластины ЭПР согласованной и несогласованной ФАР.

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Эффективная поверхность рассеяния образцов.

Частота ГГц	ЭПР диск м <sup>2</sup>	Пластина м <sup>2</sup>	ФАР согласованная, м <sup>2</sup>	ФАР КЗ, м <sup>2</sup>
1,9÷2,0	0,44	0,58	0,60	0,60
3,83÷3,93	1,87	1,62	1,69	1,68
4,77÷4,87	3,13	3,20	3,50	3,60
7,0÷7,1	6,74	9,9	9,8	9,7
9,0÷9,1	11,4	16,4	10,8	15,8
9,55÷9,75	13,1	18,8	7,4	18,1
10,0÷10,1	14,1	20,2	9,8	21,3
11,0÷11,1	17,0	24,3	20	25,0
15,0÷15,1	31,0	45,4	46,0	45,3

Анализ представленных результатов показывает, что вне рабочего диапазона антенны, ЭПР ФАР практически не отличается от максимального зеркального отражения металлической пластины. В рабочем же диапазоне (9,45 – 9,75 ГГц) ЭПР относительно отражения от металлической пластины падает на 4 – 5дБ. Для идеальной антенны КСВН < 1,2 это значение должно составить в районе 20дБ. То есть для данного элемента ФАР рассеяние ЭМВ осуществляется преимущественно пассивными элементами антенны.

В развитие предложенной методики измерения ЭПР объектов предлагается методика измерения моноэлектрической ЭПР габаритных объектов, для которых очень сложно обеспечить условие дальней зоны [2]. Но при этом к объекту предъявляется требование его электродинамической однородности на данной частоте и отсутствие на его поверхности многократных переотражений. Методика заключается в сравнении отраженного от объекта сигнала с отражением от металлического эталона, точно повторяющего форму объекта. В этом случае неоднородность падающего на объект поля как амплитудная, так и фазовая не оказывает значительного влияния.

В качестве примера на рисунке 2 приведены уровни отраженного сигнала от ФАР, состоящей из

9 рассмотренных ранее фрагментов, а на рисунке 3 от металлической пластины размерами  $a = 80$ см,  $b = 40$ см в диапазоне частот 2÷18ГГц.

Как видно, и в этом случае во всем частотном диапазоне, кроме рабочего диапазона ФАР (9÷10ГГц), ЭПР плоской ФАР практически не отличается от ЭПР эталонной плоской пластины.

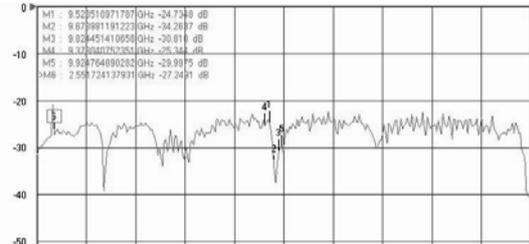


Рисунок 2 – Уровень отражения поля от ФАР

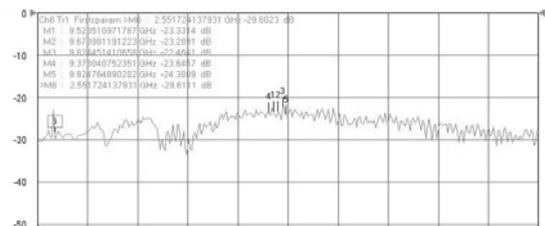


Рисунок 3 – Уровень отражения поля от пластины

При этом ЭПР пластины вычисляется математически:

$$\sigma_{\max} = 4\pi \frac{a^2 b^2}{\lambda^2} ,$$

а ЭПР ФАР  $\sigma_0$  – по разности отраженных от объекта и пластины сигналов в дБ –  $\Delta$ :

$$\sigma_0 = \sigma_{\max} \cdot 10^{\frac{\Delta}{10}} .$$

Таким образом, разработанный измерительный комплекс и методики обработки результатов позволяют измерять абсолютные значения ЭПР объектов и могут эффективно использоваться при разработке и анализе радиопоглощающих покрытий в комплексе с системами компьютерного моделирования [3].

#### Литература

1. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. – М.: Советское радио, 1975. – 348 с.
2. Майзельс Е.Н., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. – М. Советское радио, 1975 г.
3. Будай А.Г., Кныш В.П., Малый С.В. Комплексная методика расчета электродинамических параметров радиопоглощающих покрытий // Материалы Международной научной конференции ИРЭМВ-2005 «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». – Таганрог, 2005. – С. 327-329.

UDC 621

**RESEARCH OF UNSEALING PROBLEM IN CYLINDRICAL SEALED VOLUMES OF VARIOUS PURPOSES BY THE EXAMPLE OF THIN-FILM CAPACITORS**

**Royzman V.<sup>1</sup>, Voznyak A.<sup>1</sup>, Bubulis A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Khmelnitsky National University, Khmelnytsky, Ukraine*

<sup>2</sup>*Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania*

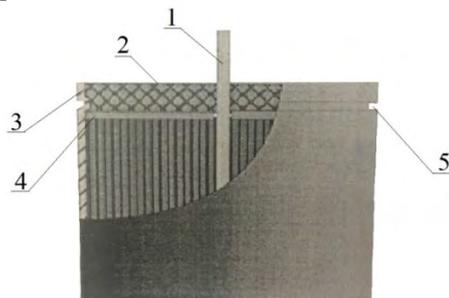
Hermetic sealing applied to electronic components, parts and units by using thermally reactive compounds based on synthetic resins is widely used in modern electronics. However, it is a matter of general experience that effect produced by hermetic sealing may not be completely achieved or even brings about lower reliability of a sealed unit because of cracking compound, breaking electric circuits and other failures caused by internal stresses. [1-3].

The paper theoretically researches this problem for cylindrical compounded hermetic units of the thin-film electrolytic capacitors.

Fig. 1 shows the scheme of the film capacitor. The capacitor's case 3 is represented as thin-wall cylindrical shell, with capacitor's section packaged inside, which is closed by non-hermetic textolite membrane 4 that has a hole for the contact pin 1.

After the capacitor has been assembled, its open side gets filled with the sealing compound. The compound polymerization occurs at 100 °C temperature. The same scheme is applied to make sealed units of various forms, sizes and purposes. The sealed unit may also be in-built into these volumes by attaching (welding) a specific appliance to a capacitor's case.

The case of capacitor is made of aluminum alloy. The contact pin is made of copper wire. The membrane is stamped from textolite.



1 – pin; 2 – compound; 3 – body; 4 – membrane; 5 - stamping a housing

Fig. 1. Developing mathematical model of compound interaction with pin and shell, and methods for providing strength and hermetic seal

To research interaction of materials, which contact inside the water-proof sealed unit, the mathematical model has been developed, in which thin-wall aluminum can is assumed as cylindrical shell loaded over the part of its length (or over the complete length) by distributed contact pressure and the deformation of this shell is hereinafter studied [4]. The strength or rigidity of compound cylinder or disk can be

considered which are subjected to the pressure of the same value but opposite sign. The interaction of the compound with shell and pin can be considered using the scheme of three-layer cylinders (shells), loaded by contact pressure in the metal/compound interface. The actual values of the contact pressure can be found from the condition of deformation compatibility in compound/shell and compound/pin contacting surfaces.

Obviously, the more the value of cylindrical rigidity is, the easier shell will follow the compound, and the less probability for compound exfoliation from shell surface will be.

Analysis of capacitor design allows assuming that having textolite membrane creates an additional circular support and in this way shortens the shell's length (by a factor of 8-10), which contacts with compound, increasing its rigidity. Therefore, we need to check if the substitution of the textolite membrane for a rubber one, which, because of its softness, cannot be actually considered a real support to tightly hold a shell, will not bring about significant shell deformation in the contact area with compound.

This paper considers a deformation of the can-shell and subsequent ways for improving flexibility of the surface contacting a compound.

The formulas derived for the case of the shell with membrane can be applied for calculation and analysis of the sealed units all along the height of the capacitor that extends from textolite membrane to its free end.

So we will consider the constant thickness round cylindrical shell being forced by the internal pressure with intensity  $q$  (fig. 2), which is symmetrical about axis and uniformly distributed all along the height of cylinder of the length  $l_2$ . The bend needs to be calculated for the middle surface of this short shell – the can of the length  $l_2$ , that extends from the membrane to its free end.

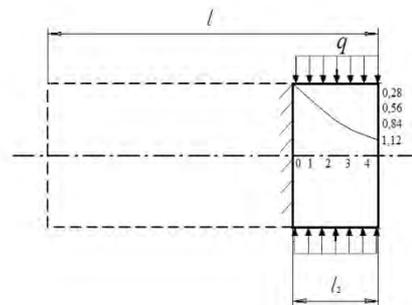


Fig. 2. Movement (bend) dependence of the short shell middle surface on its length

It is known [5] that problems relevant to symmetric deformations of constant thickness round cylindrical shell are confined integrating differential equation:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{E \cdot h}{R^2 \cdot D} \cdot y = \frac{f(z)}{D} \quad (1)$$

where  $y(z)$  – radial movement of the shell middle surface points;  $h$  – shell thickness;  $R$  – radius of the shell middle surface;  $E$  – elasticity module of material;

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$$

$D$  – cylindrical rigidity;  $\mu$  – Poisson's ratio of material;  $f(z)$  – distributed load, applied to shell middle surface; in our case we will assume that  $f(z) = q = \text{const}$ , meaning that possible irregularity of the contact pressure along the contact surface will not be considered. Then the problem is confined to finding function  $y(z)$ , i.e. solving equation:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{E \cdot h}{R^2 \cdot D} \cdot y = \frac{q}{d} \quad (2)$$

Using Krylov functions [6] which are described by expressions:

$$k_0(\varphi z) = \frac{1}{2} \cdot (e^{\beta z} + e^{-\beta z}) \cdot \cos \beta z$$

$$k_1(\beta z) = \frac{1}{4} \cdot [(e^{\beta z} + e^{-\beta z}) \cdot \sin \beta z + (e^{\beta z} - e^{-\beta z}) \cdot \cos \beta z]$$

$$k_2(\beta z) = \frac{1}{4} \cdot (e^{\beta z} - e^{-\beta z}) \cdot \sin \beta z$$

$$k_3(\beta z) = \frac{1}{8} \cdot [(e^{\beta z} + e^{-\beta z}) \cdot \sin \beta z - (e^{\beta z} - e^{-\beta z}) \cdot \cos \beta z]$$

the final bend expression is represented as:

$$y(z) = 4 \cdot \alpha \cdot \frac{\overline{k_1^2 + k_0 \cdot k_2}}{k_0^2 + 4 \cdot \overline{k_1 \cdot k_3}} \cdot k_2(\beta z) - 4 \cdot \alpha \cdot \frac{\overline{k_0 \cdot k_1 + 4 \cdot k_2 \cdot k_3}}{k_0^2 + 4 \cdot \overline{k_1 \cdot k_3}} \cdot k_3(\beta z) + \alpha \cdot [1 - k_0(\beta z)] \quad (3)$$

where  $\alpha = \frac{q}{4D\beta^4}$ ;  $k_i(\beta l_2) = \overline{k_i}$ ,  $i = 0, 1, 2, 3$ .

The formulas derived for the case of the shell without membrane can be applied for calculation and analysis of sealed units of capacitor whose textolite membrane is substituted for rubber one (or absent at all), e.t. it does not limit movement of the capacitor's shell.

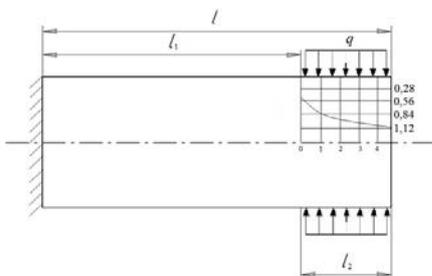


Fig. 3. Movement (bend) dependence of the long shell middle surface on its length

Now the constant thickness round cylindrical shell with the bottom at the left end, what means the shell of the length  $l = l_1 + l_2$  (long shell) will be considered. The internal pressure of intensity  $q$  is distributed along the length  $l_2$  of the cylinder at the right end of the shell. The bend calculation of the cylindrical shell for middle surface points is confined to integrating differential equation.

The generalized solution of the differential equation can be represented as the sum:  $y = y_0 + y_1$ , where:

$$y_0 = C_1 \cdot k_0(\beta z) + C_2 \cdot k_1(\beta z) + C_3 \cdot k_2(\beta z) + C_4 \cdot k_3(\beta z)$$

is generalized solution of homogenous differential equation,  $y_1$  – particular solution of that equation.

Method of operational calculus [7] is used to find particular solution of the equation  $y_1(z)$ . The generalized solution of the original equation will be:

$$y(z) = C_1 K_0(\beta z) + C_2 K_1(\beta z) + C_3 K_2(\beta z) + C_4 K_3(\beta z) + \frac{q}{4D\beta^4} \cdot [1 - K_0(\beta(z-l_1))] \cdot \eta(z-l_1) - \frac{q}{4D\beta^4} \cdot [1 - K_0(\beta(z-l))] \cdot \eta(z-l) \quad (4)$$

The values of arbitrary constants  $C_1, C_2, C_3, C_4$  will be determined from boundary conditions.

Solving the expressions, and denoting  $\alpha = \frac{q}{4D\beta^4}$ ,  $K_i(\beta l) = \overline{K_i}$ ,  $i = 0, 1, 2, 3$ , solution will appear as:

$$y(z) = 4\alpha \cdot \frac{\overline{k_1 \cdot k_1 \cdot (\beta(1-l_1)) - \overline{k_0 \cdot k_2 \cdot (\beta(1-l_1))}}{k_0^2 + 4\overline{k_1 \cdot k_3}} \cdot k_2(\beta z) - 4\alpha \cdot \frac{\overline{k_0 \cdot k_1 \cdot (\beta(1-l_1)) + 4 \cdot \overline{k_3 \cdot k_2 \cdot (\beta(1-l_1))}}{k_0^2 + 4\overline{k_1 \cdot k_3}} \cdot k_3(\beta z) + \alpha \cdot [1 - k_0(\beta(z-l_1))] \cdot \eta(z-l_1) - \alpha \cdot [1 - k_0(\beta(z-l))] \cdot \eta(z-l) \quad (5)$$

Formulas (3) and (5) have been used to perform bend calculation of the middle surface of the short cylindrical shell (with installed textolite membrane) and the long one (without the membrane), correspondently, in points shown in fig. 2-3 with the following numbers of the shells' geometric sizes  $l = 50$  mm,  $l_2 = 50$  mm,  $h = 0,2$  mm,  $R = 16,9$ mm. The material of the shell is aluminum alloy AD1.

The calculation results are represented in graphs in figures 2-3, where the bend  $y(z)$  is expressed in relative units:

$$\alpha = \frac{q}{4D\beta^4}$$

The assessment of calculation results (graphs) demonstrates that the bends of the researched shells significantly differ only in small interval, 0.2 mm, near the membrane, what means that in the can with membrane the compound exfoliation may start near the membrane and furthermore spread, in favorable conditions, all the way along the compound. Therefore, one of the recommendations made on this assessment is to provide sufficient clearance between capacitor's shell and textolite membrane.

To prevent the compound leaking into this clearance, that can be closed, for an instance, by rubber-type compound.

For this purpose textolite membrane can be substituted for rubber one, which will allow free shell's deformations when it is forced by the load of compound. Finally, the flexibility of the shell can be increased in the area  $l_2$ , where it contacts with compound and that will be demonstrated in the second part of the paper.

#### References

1. Ройзман В.П., Возняк А.Г., Горошко А.В. Проблема міцності і герметичності компаундованих виробів РЕА, збірник тез і доповідей, Угорщина, 2016, 37–39 с.
2. Марков В.Ф., Мухамедзянов Х.Н., Маскаева Л.Н. Материалы современной электроники. – издательство Уральского университета, 2014. – 270 с.

3. Иванова Н.Ю., Комарова И.Э., Бондаренко И.Б. Электрорадиоэлементы. Часть 2. Электрические конденсаторы. – Санкт-Петербург, 2015. – 34 с.

4. Ройзман В.П. Термопрочность компаундированных пассивных электронных элементов / В.П. Ройзман, И.И. Ковтун, С.А. Петрашук // Современные информационные и электронные технологии : тр. Третьей междунар. научно-практ. конф. (СИЭТ-2002). – Одеса: Одесский политехн. университет, ОАО «Нептун», 2002. – 145 с.

5. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шор, Г.Б. Йосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 502 с.

6. Амосов А.А. Техническая теория тонких упругих оболочек. – М.: Издательство ассоциации строительных узлов, 2009 – 303 с.

7. Владимиров В.С., Жаринов В.В. Уравнения математической физики. – Москва: Физматлит, 2004. – С. 318-333.

УДК 621.315

### ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ PbSnTe

Иванов В.А.<sup>1</sup>, Красовский В.В.<sup>1</sup>, Гременок В.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь

Полупроводниковые соединения  $A^{IV}B^{VI}PbTe$  и  $SnTe$  являются материалами с хорошими термоэлектрическими свойствами а также интересны как потенциальные материалы для длинноволновых инфракрасных детекторов [1-3]. Ширина запрещенной зоны этих материалов изменяется от  $E_g = 0,18$  eV для  $SnTe$  до  $E_g = 0,32$  eV для  $PbTe$  [4]. Эти соединения кристаллизуются в кубической решетке типа NaCl и являются во многих отношениях аналогами. По сходству структур соединений  $SnTe$  и  $PbTe$  и близости величин постоянных кристаллических решеток можно предположить наличие между этими соединениями непрерывного ряда твердых растворов.  $PbTe$  кристаллизуется в составе, близком к стехиометрическому, и необходимая концентрация носителей тока получается добавлением соответствующих примесей (например, галогенов для получения  $n$ - $PbTe$  и щелочных металлов для получения  $p$ - $PbTe$ ). Вакансии в подрешетке свинца являются акцепторами, а в подрешетке теллура – донорами. В специально нелегированных образцах электрические свойства в первую очередь определяются концентрацией избыточных атомов теллура и свинца.  $SnTe$  всегда кристаллизуется с большой концентрацией вакансий в металлической подрешетке. Вакансии металла в кристаллической решетке образуют в запрещенной

зоне этого полупроводникового соединения акцепторные энергетические уровни и данное полупроводниковое соединения имеет  $p$ -тип проводимости. Изменение состава системы  $PbTe$ - $SnTe$  приводит к изменению всех свойств. Поэтому исследование свойств такого полупроводникового соединения, полученного в виде тонких пленок представляет большой интерес как для термоэлектрического так и для фотоэлектрического применения.

Для получения пленок  $PbSnTe$  выбран метод термического вакуумного нанесения типа «горячей стенки». При этом методе перенос паров испаряемого материала мишени проходит в цилиндрическом канале, температура стенок которого не ниже температуры испарителя. В качестве подложек были использованы стекла марки Corning 7059. В качестве исходного материала для напыления использовались порошки поликристаллических слитков, предварительно синтезированных методом сплавления в вакууммированных кварцевых ампулах. В данной работе приведены результаты исследований температурных зависимостей подвижности носителей заряда в тонких пленках  $PbSnTe$  разных составов.

Температурные зависимости подвижности носителей заряда регистрировались в температурном интервале 100-400К, при этом

подвижность носителей заряда определялась методом Холла в магнитном поле 1,72 тесла.

Кристаллическая структура полученных поликристаллических пленок была исследована рентгеновской дифрактометрией (XRD), используя Siemens D-5000 дифрактометр с  $\text{CuK}_\alpha$  источником. Идентификация фаз проводилась сравнением экспериментально установленных межплоскостных расстояний  $d$  с данными таблиц JCPDS. Элементный состав пленок был исследован с помощью сканирующего электронного микроскопа Stereoscan F-360 с EDX спектрометром 10000 с точностью около 2%. На рисунке 1 приведены микрофотографии скола пленок двух составов.

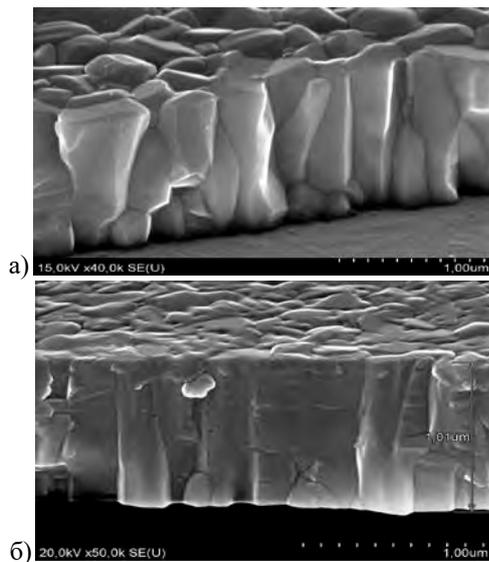


Рисунок 1 – Микрофотографии скола плёнок PbSnTe с концентрацией атомов свинца: а) – 9,78 ат. % и б) – 32,91 ат. %

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что все полученные пленки толщиной 1.0 – 3.0 мкм были поликристаллическими, однофазными и содержали только фазу кубической структуры (структура типа NaCl), при отсутствии каких-либо посторонних кристаллических фаз. Микроструктура полученных пленок имеет вид плотноупакованных столбчатых кристаллитов с направлением роста перпендикулярно подложке. Все пленки имели избыток атомов теллура.

Наиболее эффективными центрами рассеяния электронов и дырок в полупроводнике являются тепловые колебания атомов решетки и заряженные ионы примесей. Роль примесей могут играть дефекты кристаллической решетки. При рассеянии на акустических колебаниях атомов подвижность  $\mu = A(kT)^{-3/2}$ , где  $A$  – коэффициент не зависящий от температуры и энергии. При рассеянии носителей заряда на заряженных ионах примеси подвижность  $\mu = B(kT)^{3/2}$ , где  $B$  – также коэффициент не зависящий от температуры и энергии. Переход от примесного рассеяния носителей заряда к решеточному происходит при тем более высоких

температурах, чем больше концентрация заряженных центров в полупроводнике. Если учитывать только рассеяние на ионах примеси и тепловых колебаниях решетки, то можно прийти к выводу, что подвижность с ростом температуры растет пропорционально  $T^{3/2}$ , проходит через максимум и затем уменьшается пропорционально  $T^{-3/2}$ . Если в полупроводнике действуют оба механизма рассеяния, тогда

$$1/\mu = AT^{-3/2} + BT^{3/2}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – не зависящие от температуры величины [5].

Исследования эффекта Холла позволили определить величины подвижностей носителей заряда в пленках.

На рисунке 2 показаны температурные зависимости подвижностей носителей заряда для пленок двух составов.

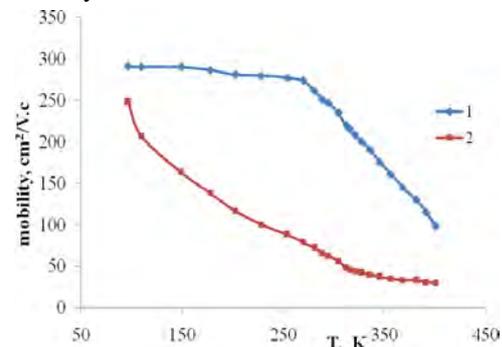


Рисунок 2 – Температурные зависимости подвижности носителей заряда плёнок PbSnTe с концентрацией атомов свинца: 1 – 9,78 ат. %, 2 – 32,91 ат. %

На пленках 1 и 2 температурная зависимость подвижности проявляется иначе. Если для пленок с небольшой концентрацией атомов свинца с ростом температуры подвижность уменьшается слабо, то для относительно больших концентраций свинца подвижность уменьшается более интенсивно во всем температурном интервале. Отличие температурной зависимости подвижности пленки 2 можно объяснить более высокой концентрацией вакансий атомов металла из-за относительно большой концентрации атомов теллура. Для пленок 1 и 2 согласно (1) во всем температурном интервале одновременно действуют два механизма рассеяния носителей заряда с небольшим преобладанием механизма рассеяния на колебаниях решетки.

В результате проведенных исследований установлено, что пленки PbSnTe являются невырожденными полупроводниками  $p$ -типа проводимости. Увеличение концентрации атомов свинца приводит к уменьшению электропроводности. С ростом концентрации атомов теллура подвижность носителей заряда увеличивается, при этом происходит преобладание механизма рассеяния носителей заряда на тепловых колебаниях решетки с ростом температуры пленок.

Полученные результаты указывают на перспективность развития работ по применению тонких пленок PbSnTe для создания различных тонкопленочных преобразователей. Перспективность предложенного метода синтеза пленок  $Pb_xSn_{1-x}Te$  обусловлена возможностью применения на всех стадиях технологического процесса промышленных методов, обеспечивающих получение однородных слоев большой площади.

Литература

1. Равич, Ю.И. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам

свинца PbTe, PbSe, PbS / Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. – М.: Наука, 1968. – 383 с.

2. Соминский, М.С. Полупроводники / М.С. Соминский. – Л.: Наука, 1967. – 440 с.

3. Иоффе, А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы / А.Ф. Иоффе. – Изд. АН СССР, 1957. – 257 с.

4. Nicolic, P.M. Optical energy gaps of PbTe-SnTe / P.M. Nicolic // Brit. J. Appl. Phys. – 1987. – Vol. 18. – p. 897–903.

5. Киреев, П.С. Физика полупроводников / П.С. Киреев. – М.: Высшая школа, 1969. – 592 с.

УДК 53.091

### ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАРТЕНСИТНЫХ ПЕРЕХОДОВ В TiNi СПЛАВЕ

Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Рубаник В.В. мл.<sup>1</sup>, Лесота А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», Витебск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>УО «Витебский государственный технологический университет», Витебск, Республика Беларусь

Материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) активно исследуются и применяются в различных областях медицины и техники. Эти материалы способны восстанавливать значительные неупругие деформации при изменении температуры, проявлять сверхэластичность в изотермических условиях, преобразовывать тепловую энергию в механическую работу и т. д. Их уникальные свойства находят обширное применение в инженерной практике – при проектировании исполнительных механизмов и силового оборудования, в медицине – для создания имплантов и инструментария, способного изменять форму рабочей части [1–3].

Важными характеристиками сплавов с ЭПФ являются температуры мартенситных переходов, при которых происходит формовосстановление элементов с памятью формы. На характеристические температуры влияет как соотношение основных компонентов (титана и никеля), так и механические напряжения, возникающие при деформации этих сплавов в результате фазового, деформационного наклепа и пр. [4]. Известно [5], что механические свойства материалов с термоупругими мартенситными превращениями существенным образом зависят от температуры деформирования, точнее, её расположения относительно характеристических температур обратимых фазовых переходов. Таким образом, исследование влияния пластической деформации на характеристические температуры фазовых переходов никелида титана является важным этапом на пути внедрения этого материала в промышленность.

Использовали проволоочные образцы никелида титана с составом близким к эквиатому длиной 150 мм и диаметром 0,6 мм, предварительно отожжённые при температуре 600 °С в течение 30

минут с закалкой на воздухе. Деформирование одноосным растяжением проводили на испытательной машине ИП 5158-5 до 40 % при комнатной температуре (23±1 °С). Наводимая величина деформации в образцах составляла 5, 10, 15, 20, 30 и 40 %. Вид деформационной кривой представлен на рисунке 1. В исходном состоянии образцы находились в мартенситном состоянии и характеристические температуры, определенные методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC822° METTLER TOLEDO, составляли:  $M_n = 39$  °С,  $M_k = 27$  °С,  $A_n = 60$  °С,  $A_k = 78$  °С при скорости нагрева и охлаждения 5 °С/мин. Реализация в материале обратного фазового перехода после отжига идет одностадийно по схеме B2 → B19', а прямого – по схеме B19' → B2.

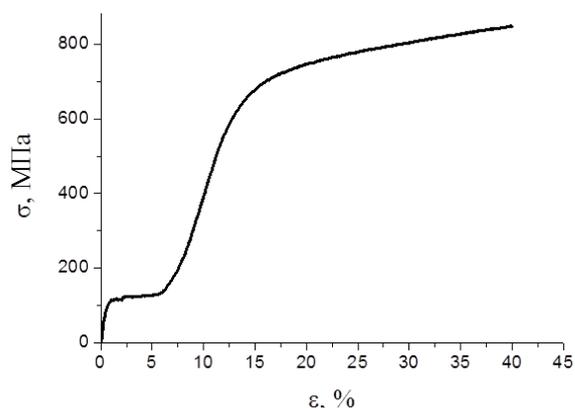
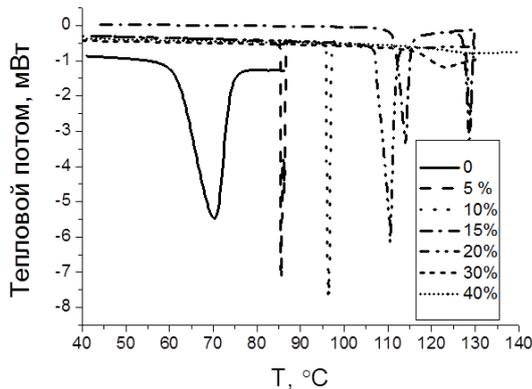


Рисунок 1 – Деформационная кривая TiNi сплава

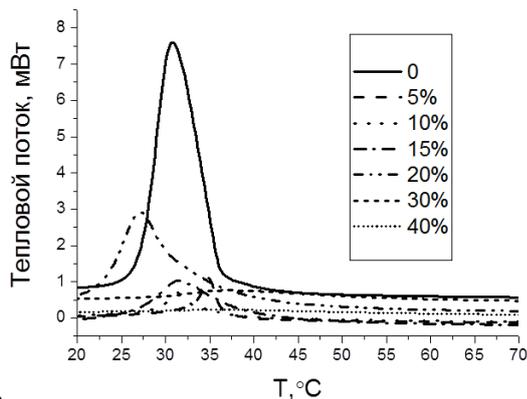
На деформационной кривой при напряжениях 100–110 МПа регистрируется фазовый предел текучести, что вызвано переориентацией мартенситных пластин в материале при деформации порядка 5 %. Дальнейшая

деформация образца до 40 % не вызывает его разрушения.

Анализ температурных зависимостей теплового потока (рисунок 2) показал, что предварительная деформация TiNi образцов приводит к смещению температурных интервалов как прямого, так и обратного фазовых переходов: с увеличением величины деформации TiNi образцов увеличивается значение температур, соответствующих температурным пикам ( $A_n$ ,  $A'_n$ ) обратного фазового перехода (нагрев), в то время как при прямом фазовом переходе (охлаждение) температуры пиков поглощения теплоты ( $M_n$ ) существенно не изменяются (рисунок. 3).



а)



б)

Рисунок 2 – Калориметрические зависимости никелида титана при нагреве (а) и охлаждении (б) после их предварительной деформации

После деформации TiNi образцов на 15 % и более, кинетика обратного фазового перехода

изменяется при нагреве с  $B19' \rightarrow B2$  на  $B19' \rightarrow R \rightarrow B2$  с образованием промежуточной ромбоэдрической R фазы, в то время как при охлаждении остается прежней  $B2 \rightarrow B19'$ .

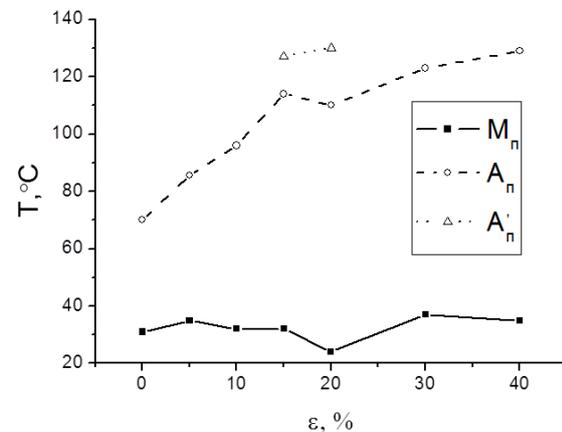


Рисунок 3 – Зависимость характеристических температур фазовых переходов никелида титана от предварительной деформации

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта БРФФИ-РФФИ М № Т17РМ-112.

#### Литература

1. Ооцука, К. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Сумидзу, Ю. Судзуки [и др.] ; под ред. Х. Фунакубо ; пер. с японск. И.И. Дружинина. – М.: Металлургия, 1990. – 224 с.
2. Материалы с эффектом памяти формы: Справ изд.: в 4 т. / под ред. В.А. Лихачева. – СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998.
3. Гюнтер, В.Э. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / В.Э. Гюнтер [и др.]. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – 487 с.
4. Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications / V. Brailovskii, S. Prokoshkin, P. Terriault and F. Trochu. – Montreal: ETS Publ., 2003. – 844 p.
5. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В.Э. Гюнтер [и др.]. – Томск: Изд-во МИЦ, 2006. – 296 с.

УДК 534-16:534-8:621.9.048.6

### ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТРОМБОЭКТОМИИ

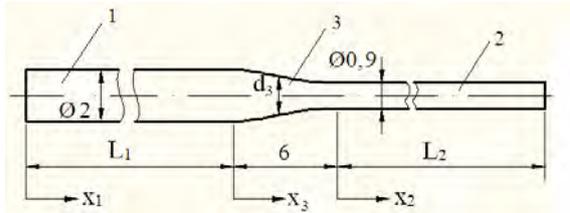
Степаненко Д.А., Бунчук К.А., Емельянова А.С., Плескач М.А., Солодкая Н.В.  
Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Для ультразвукового разрушения тромбов в кровеносных сосудах (ультразвуковой тромбоэктомии) применяются ступенчатые волноводы с плавными переходными участками между ступенями, обеспечивающие высокий

коэффициент усиления колебаний по амплитуде при малой концентрации напряжений [1]. Авторами разработано несколько методик расчета и проектирования подобных волноводов, в частности, методика, основанная на

использовании метода передаточных матриц [2]. Однако остался нерассмотренным вопрос о влиянии погрешностей изготовления волноводов на их эксплуатационные характеристики, в частности, на резонансные частоты продольных колебаний.

В качестве объекта исследования рассмотрим двухступенчатый волновод, схема конструкции которого приведена на рисунке 1.



1, 2 – ступени волновода, 3 – переходный участок

Рисунок 1 – Схема конструкции волновода для ультразвуковой тромбозектомии

Зависимость диаметра переходного участка  $d_3$  от продольной координаты  $x_3$  задается таблицей 1.

Таблица 1

$x_3$ , мм	0	1	2	3	4	5	6
$d_3$ , мм	2,00	1,89	1,62	1,33	1,13	1,00	0,90

Условие резонанса продольных колебаний волновода может быть записано в виде

$$T_{21}(f, L_1, L_2) = 0, \quad (1)$$

где  $f$  – частота колебаний,  $\mathbf{T}(f, L_1, L_2)$  – передаточная матрица волновода [2], определяемая по формуле

$$\mathbf{T}(f, L_1, L_2) = \mathbf{T}_2(f, L_2) \mathbf{T}_3(f) \mathbf{T}_1(f, L_1),$$

$\mathbf{T}_1$ ,  $\mathbf{T}_2$  – передаточные матрицы ступеней,  $\mathbf{T}_3$  – передаточная матрица переходного участка.

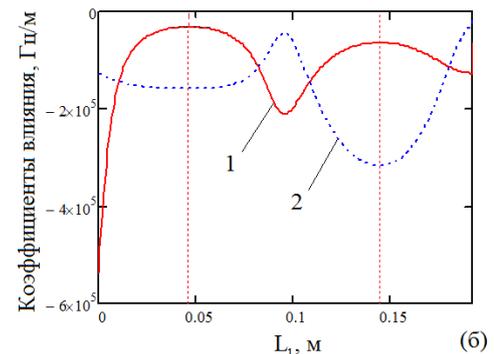
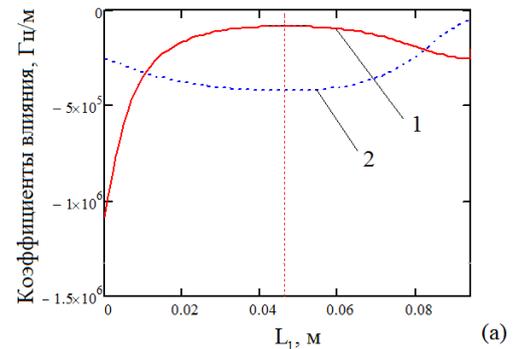
Для оценки влияния погрешностей изготовления волновода  $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$  на изменение его резонансной частоты  $\Delta f_{рез}$  необходимо записать условие резонанса (1) через безразмерные переменные  $\tilde{f}$ ,  $\tilde{L}_1$  и  $\tilde{L}_2$ , связанные с исходными переменными  $f$ ,  $L_1$  и  $L_2$  таким образом, что конечным приращениям исходных переменных соответствуют малые приращения безразмерных переменных:

$$\tilde{f} = \frac{f}{f_0}, \quad \tilde{L}_1 = \frac{L_1}{\lambda}, \quad \tilde{L}_2 = \frac{L_2}{\lambda},$$

где  $\lambda = \frac{c}{f}$  – длина продольной волны в материале

волновода,  $c$  – скорость распространения продольной волны в материале волновода,  $f_0 = c/2(L_1 + L_2)$  – резонансная частота основной

моды продольных колебаний волновода постоянного диаметра с длиной  $L_1 + L_2$ .



1 – для 1-й ступени, 2 – для 2-й ступени

Рисунок 2 – Расчетные кривые зависимости коэффициентов влияния погрешностей от длины  $L_1$  первой ступени волновода: (а) для  $n = 1$ ; (б) для  $n = 2$

Приращение передаточной матрицы резонансного волновода при произвольных малых изменениях  $\Delta \tilde{f}$ ,  $\Delta \tilde{L}_1$ ,  $\Delta \tilde{L}_2$  безразмерных параметров можно определить путем ее разложения в ряд Тейлора, ограничившись членами первого порядка малости:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{T}(\tilde{f}_{рез}, \tilde{L}_{1рез}, \tilde{L}_{2рез}) &= \left. \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \tilde{f}} \right|_{\tilde{f}=\tilde{f}_{рез}, \tilde{L}_1=\tilde{L}_{1рез}, \tilde{L}_2=\tilde{L}_{2рез}} \Delta \tilde{f} + \\ &+ \left. \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \tilde{L}_1} \right|_{\tilde{f}=\tilde{f}_{рез}, \tilde{L}_1=\tilde{L}_{1рез}, \tilde{L}_2=\tilde{L}_{2рез}} \Delta \tilde{L}_1 + \\ &+ \left. \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \tilde{L}_2} \right|_{\tilde{f}=\tilde{f}_{рез}, \tilde{L}_1=\tilde{L}_{1рез}, \tilde{L}_2=\tilde{L}_{2рез}} \Delta \tilde{L}_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Из условия резонанса (1) и разложения (2) может быть получено следующее выражение, связывающее приращение резонансной частоты продольных колебаний волновода с абсолютными погрешностями его геометрических параметров:

$$\begin{aligned} \Delta f_{рез} &= K_{\Delta f, L_1}(f_{рез}, L_{1рез}, L_{2рез}) \Delta L_1 + \\ &+ K_{\Delta f, L_2}(f_{рез}, L_{1рез}, L_{2рез}) \Delta L_2, \end{aligned}$$

где коэффициенты влияния погрешностей геометрических параметров волновода на резонансную частоту определяются формулой

$$K_{\Delta f, L_1}(f_{рез}, L_{1рез}, L_{2рез}) = -\frac{f_{рез}}{2(L_{1рез} + L_{2рез})} \times \frac{\left( \frac{\partial \Gamma}{\partial L_i} \Big|_{\tilde{f}=f_{рез}/f_{0рез}, L_1=L_{1рез}/\lambda_{рез}, L_2=L_{2рез}/\lambda_{рез}} \right)_{21}}{\left( \frac{\partial \Gamma}{\partial \tilde{f}} \Big|_{\tilde{f}=f_{рез}/f_{0рез}, L_1=L_{1рез}/\lambda_{рез}, L_2=L_{2рез}/\lambda_{рез}} \right)_{21}}$$

Аналогичные коэффициенты влияния используются в теории измерительных приборов для оценки влияния первичных погрешностей на точность показаний прибора.

В качестве численного примера рассмотрим влияние погрешностей изготовления волновода на резонансную частоту при следующих исходных данных: резонансная частота  $f_{рез} = 25$  кГц, скорость звука  $c = 4900$  м/с. На рисунке 2 приведены расчетные зависимости коэффициентов влияния погрешностей геометрических параметров волновода на резонансную частоту от длины  $L_1$  первой ступени для мод продольных колебаний с порядками  $n = 1$  и  $n = 2$ .

Длина второй ступени  $L_2$  при заданных резонансной частоте  $f_{рез}$  и порядке  $n$  моды продольных колебаний связана с длиной первой ступени  $L_1$  однозначной зависимостью, которая описывается условием резонанса (1), в связи с чем коэффициенты влияния погрешностей можно рассматривать как зависящие только от  $L_1$ . Значения длины  $L_1 = 46,3$  мм и  $L_1 = 144,3$  мм, соответствующие максимальному значению коэффициента усиления, отмечены на рисунке 2 вертикальными линиями. Как видно из рисунка, в указанных точках коэффициент влияния погрешности длины  $L_1$  принимает минимальное по модулю значение, а коэффициент влияния погрешности длины  $L_2$  – максимальное по модулю значение (при  $n = 2$  минимальное и максимальное значения понимаются в смысле локальных

экстремумов). При этом независимо от  $n$  и  $L_1$  указанные значения отличаются примерно в 4,9 раза. Расчет показывает, что для волноводов с максимальным коэффициентом усиления отношение  $K_{\Delta f, L_2}/K_{\Delta f, L_1}$  остается примерно равным 4,9 и при других значениях резонансной частоты: при изменении частоты в диапазоне от 20 до 30 кГц оно изменяется в интервале от 4,893 до 4,912. Из полученного результата следует, что для компенсации изменений резонансной частоты, вызванных малыми технологическими погрешностями размера  $L_2$  второй ступени, может потребоваться значительное (по сравнению с изменением длины  $L_2$ ) подстроечное изменение размера  $L_1$  первой ступени, в связи с чем размер  $L_1$  выполняется большим расчетного значения  $L_{1рез}$ : в частности, при технологической погрешности размеров  $L_1$  и  $L_2$ , равной  $\pm 0,1$  мм, компенсация изменения резонансной частоты путем подстройки длины первой ступени возможна при условии  $L_1 = (L_{1рез} + 0,6) \pm 0,1$ .

Таким образом, разработанная методика расчетов позволяет проектировать ультразвуковые волноводы для тромбозэктомии с учетом влияния возникающих при их изготовлении технологических погрешностей на резонансную частоту продольных колебаний и анализировать возможность компенсации этого влияния путем подстройки геометрических размеров волновода.

#### Литература

1. Минченя, В.Т. Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 6-16.
2. Исследование продольных колебаний гибких ультразвуковых волноводов с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 71-75.

УДК 621.391.1(075.8)

## ПРИБОР КОНТРОЛЯ РОЛИКОВ

Есьман Г.А., Новицкий М.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Прибор контроля роликов предназначен для контроля прямолинейности образующей (конических и цилиндрических роликов), непостоянства диаметра и угла конуса конических роликов. Применяется в подшипниковой отрасли.

Целью разработки данного прибора является совмещение контроля нескольких параметров на одном устройстве, а также снижение утомляемости оператора.

Прибор оснащен системой передачи данных с измерительных головок на ЭВМ, что обеспечивает автоматический сбор данных контроля. Результат

контроля отображается на мониторе ЭВМ в виде номера группы для сортировки. По результатам контроля происходит разделение роликов на годные и бракованные (дефектные). Годные ролики сортируются по группам, которые указаны в числовой области экрана ЭВМ. Для удобства все данные выводятся в таблице excel.

Прибор для контроля роликов представлен на рисунке 1.

На столе (04) находится измерительное устройство (01). При контроле параметров ролика данные с измерительного устройства (01), через

распределительный блок (02), поступают на ЭВМ (03) и отображаются в удобной для нас форме.

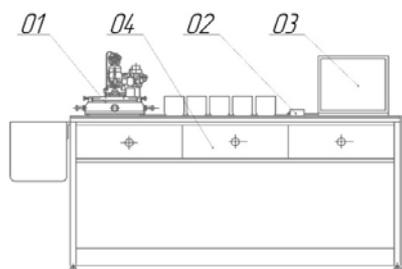
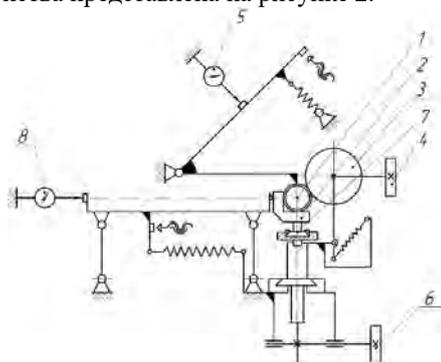


Рисунок 1 – Прибор контроля роликов

Кинематическая принципиальная схема устройства представлена на рисунке 2.



1 – контролируемый ролик; 2 – призма; 3 – приводной ролик; 4 – маховичок приводного ролика; 5,8 – измерительные головки; 6 – маховичок приводного вала; 7 – каретка

Рисунок 2 – Кинематическая схема прибора контроля роликов

Перед началом контроля проводят настройку прибора. Для настройки прибора при измерении цилиндрических роликов устанавливают измерительную головку 8 в державку параллелограммного механизма с натягом 0,2 мм. Перемещая установочный механизм вправо и влево до упора маховичком 6, наблюдают за показаниями измерительной головки. При отклонении показаний измерительной головки, добиваются такого положения призмы 2, при котором показания измерительной головки 8 совпадут в крайних положениях. Устанавливают ролик 1 в призму 2, а приводной ролик 3 в положение, обеспечивающее надёжное базирование детали в призме 2. Устанавливают необходимый ход каретки согласно нормативной документации. Крайние измерительные сечения контролируют на ролике 1 по краске.

Для настройки прибора при измерении конических роликов поворачивают призму 2 в горизонтальной плоскости приблизительно на угол  $\alpha/2$ , в вертикальной плоскости на угол  $\alpha$ . Устанавливают аттестованный ролик в призму 2 и регулируют положение приводного ролика 3, обеспечивая надёжное базирование детали в призме 2. Выводят ролик 1 в левое измерительное сечение. Наносят на ролик краску. Снимают ролик

с призмы 2 и измеряют расстояние от базового торца, до риски штангенциркулем. Передвигают каретку 7 на разницу между измеренной величиной и значением аттестации. Устанавливают параллельность верхней образующей ролика 1 направляющим каретки в горизонтальной плоскости. Устанавливают измерительную головку 8 с натягом 0,2 мм при крайнем правом положении каретки 7. Перемещая каретку 7 вправо контролируют показания головки 8. Добиваются разности показаний измерительной головки 8 в крайних сечениях равных  $k$ :

$$k = \frac{D_1 - D_2}{2},$$

где  $D_1$  – значение диаметра ролика в большем сечении;  $D_2$  – значение диаметра ролика в меньшем сечении.

Устанавливают параллельность верхней образующей ролика 1 направляющим каретки 7 в вертикальной плоскости. Для этого устанавливают наибольшее показания измерительной головки 5. Регулируя угол наклона в вертикальной плоскости добиваются разности показаний измерительной головки 5 в крайних положениях каретки разной разности отклонения от номинальных значений диаметров ролика с учетом знака. Устанавливают значение диаметра ролика 1 в аттестованном сечении. Перемещают каретку в крайнее правое положение, устанавливают отклонение от номинального значения диаметра ролика 1 в большем сечении.

Схема устройства контроля роликов представлена на рисунке 3.

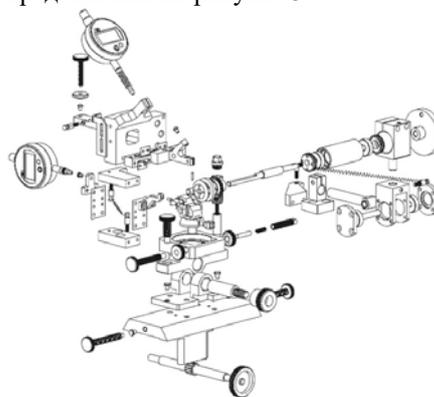


Рисунок 3 – Схема контроля роликов

После настройки прибора проводят контроль параметров ролика. Для контроля параметров устанавливают контролируемый ролик 1 на измерительную позицию в призму 2 и прижимают приводным роликом 3. Вращая маховичок приводного ролика 4, проворачивают ролик 1 на 2-3 оборота и следят за показаниями измерительной головки 5 (контроль непостоянства диаметра). После этого определяют отклонение от угла конуса (для конических роликов) или конусообразность (для цилиндрических роликов) и прямолинейность образующей. Для этого вращая маховичок приводного вала 6, перемещают каретку 7 вправо и

влево до упоров, также следят за показаниями измерительной головки 8.

Схема контроля цилиндрических роликов представлена на рисунках 4а и 4б, а конических на рисунках 5а и 5б.

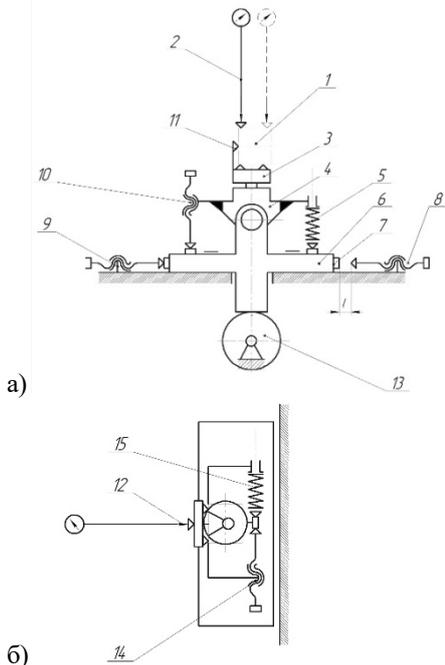


Рисунок 4 – Схема контроля цилиндрических роликов

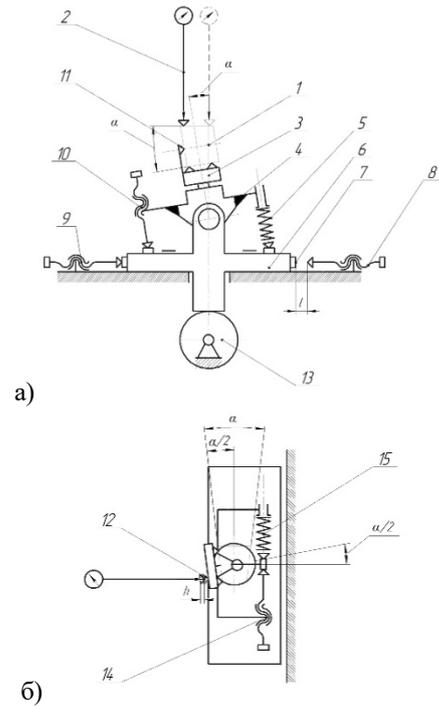


Рисунок 5 – Схема контроля конических роликов

Здесь: 1 – контролируемый ролик; 2,12 – измерительная головка; 3 – призма; 4 – корпус; 5,7-9,14,15 – винт; 6 – кронштейн; 7 – пятка; 11 – упор; 13 – вал шестерня.

УДК 620.179.16-534.1

### ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАССЕЙВАНИЯ УПРУГИХ ВОЛН НЕОДНОРОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

Баев А.Р.<sup>1</sup>, Майоров А.Л.<sup>1</sup>, Захаренко В.В.<sup>2</sup>, Размыслович Г.И.<sup>1</sup>, Парадинец В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Повышение износостойкости и долговечности объектов различного функционального назначения путем нанесения на их поверхность защитных покрытий требует также и проведения своевременного неразрушающего контроля. Для этих целей преимущественно используются ультразвуковые (УЗ) методы, позволяющие выявлять дефекты сцепления материалов по данным изменения амплитуды, фазы волны, частотного или фазового спектра отраженной или прошедшей через неразъемное соединение объекта зондирующей волны [1].

Решение актуальной задачи по повышению чувствительности, а также выявлению слабоотражающих звук (СОЗ) дефектов неразъемных соединений, выполненных сваркой, пайкой, склейкой и др. способами в объектах сложного профиля, обычно требует существенного усложнения аппаратуры и методики контроля. Отметим, что граница сцепления материалов с дефектом типа СОЗ характеризуется акустическим импедансом  $R_D = X_D + jX_D^* = R_{D0} \exp(-j\varphi_D)$

относительно падающей на него волны, который как по абсолютной величине, так и фазе близок к импедансу бездефектной зоны сцепления материалов  $R_H$ . Т.е.,  $R_{D0} \rightarrow R_{H0}$ ,  $\varphi_H \rightarrow \varphi_D$ , где  $R_{D,H0} = (X_{D,H}^2 + X_{D,H}^{*2})^{0.5}$ ,  $\varphi_{D,H} = \arctg \frac{X_{D,H}^*}{X_{D,H}}$ .

Для решения этой важной для практики задачи воспользуемся подходом, предложенным нами ранее в работе [2] и заключающемся в создании таких условий, при которых: а) фазовый сдвиг отраженной от дефектной и бездефектной границы материалов  $\Delta\varphi_{D,H} = \varphi_D - \varphi_H$  достигает максимального значения; б) подбираются оптимальные значения апертур и углов наклона излучающего и приемного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), а также направление сканирования, при котором наблюдаются максимальные изменения амплитуды отраженной волны. Ранее была показана эффективность этого метода для случая, когда фазовый сдвиг  $\Delta\varphi_{D,H} \sim \pi$ . Нами путем теоретического и экспериментального моделирования показана принципиальная возможность повышения

чувствительности метода при существенном снижении  $\Delta\varphi_{D,H}$ , характеризующем качество сцепления материалов. Расчет результирующего поля рассеяния  $F_{D,H}(\theta) = F_D + F_H$  проводился в аксиальном приближении с использованием принципа суперпозиции, где

$$F_{D,H}(\theta) \sim \int_{S_{D,H}} \chi_{D,H}(\theta) \exp(-jk_R r_{BM}) \frac{1}{r_{BM}} dS,$$

где  $\chi_{D,H}(\theta)$  – функция направленности элементарного источника;  $k_R$  – волновой вектор;  $r_{BM}$  – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения.

При экспериментальном исследовании предложено использовать в качестве объекта, моделирующего неоднородную границу с заданным фазовым сдвигом  $\Delta\varphi_{D,H}$  между отраженными от дефектной и бездефектной поверхности волнами, стальной образец в виде параллелепипеда (рисунок 1). Отражающая поверхность его выполнена ступенчатой формы с характерной высотой ступенек  $\delta \ll \lambda$ , при которых величина  $\Delta\varphi_{D,H} \approx 2\pi f\delta / \cos\beta$ , где  $\lambda$  – длина волны заданной упругой моды.

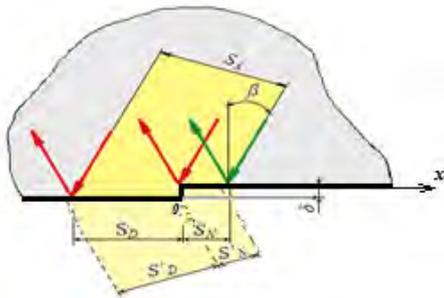


Рисунок 1 – Предложенная конструкция стального образца в виде параллелепипеда с отражающими поверхностями ступенчатой формы для моделирования процессов формирования акустического поля рассеянных неоднородной границей, обеспечивающего разные значения  $\Delta\varphi_{D,H}$

При проведении настоящих исследований в режиме эхо объемные и поверхностные волны возбуждаются и принимаются одним и тем же ПЭП. Некоторые результаты численных и экспериментальных данных, находящиеся в хорошем качественном соответствии и приведены на рисунках 2–4.

Как подтверждено экспериментально, установка угла приема ПЭП упругих волн, рассеянных неоднородной границей  $\theta$ , в положение, соответствующее минимумам или максимумам первого и второго порядка  $\theta = \theta_{\pm}$  (которых два) поля мнимого источника опорного сигнала, может приводить к существенному изменению амплитуды сигнала как объемной, так и поверхностной волны, достигающему десятки дБ даже при  $\Delta\varphi_{D,H} \sim \frac{\pi}{8}$ . Это достигается в процессе пересечения акустическим пучком модельной границы, отделяющей дефектную и бездефектную границы.

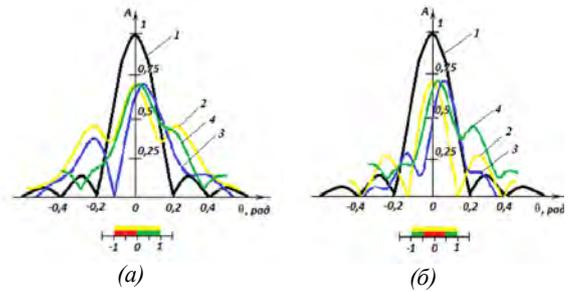


Рисунок 2 – Пример эволюции структуры акустического поля рассеяния при движении пятна акустического пучка шириной  $2a$  вдоль оси  $x$  относительно модельного дефекта размером  $l_D = a$  при разных значениях фазового сдвига  $\Delta\varphi_{D,H}$ :

$$x = -0,5 \text{ (a)}, 0 \text{ (б)}; \Delta\varphi_{D,H}, \text{ рад.} = 0 \text{ (1)}, \pi \text{ (2)}, \frac{\pi}{6} \text{ (3)}, \frac{\pi}{8} \text{ (4)}$$

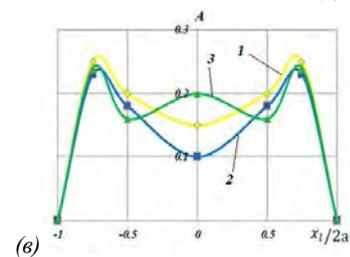
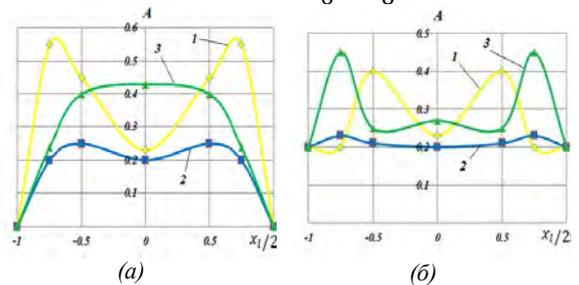


Рисунок 3 – Амплитуда рассеянной волны, принимаемая под фиксированным углом  $\theta$  в процессе перемещения пятна акустического пучка вдоль  $x$  относительно дефекта: (а) - угол минимума первого порядка (а), максимума первого порядка (б), минимума второго порядка (в);  $\Delta\varphi_{D,H}$ , рад. =  $\pi$  (1),  $\frac{\pi}{6}$  (2),  $\frac{\pi}{8}$  (3)

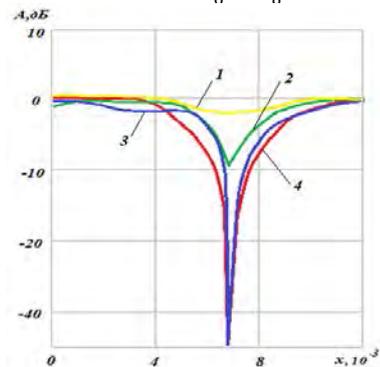


Рисунок 4 – Расчетные (1-3) и экспериментальные (4) зависимости амплитуды отраженных волн Рэлея от модельной неоднородной границы с  $\Delta\varphi_{D,H} \approx 0,5\pi$  при движении ПЭП параллельно последней; угол поворота плоскости падения ПЭП относительно нормали к указанной границе  $\theta = 0^\circ$  (1);  $5^\circ$  (2);  $7^\circ$  (3, 4)

Таким образом, анализ данных полученных расчетным и экспериментальным путями свидетельствует об эффективности использования усовершенствованной схемы для выявления слабоотражающих звук дефектов сцепления материалов. В особенности это касается потенциально опасных дефектов, включая дефекты слипания.

УДК 620.179.16-534.1

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

**Баев А.Р., Майоров А.Л., Левкович Н.В., Асадчая М.В., Жаворонков К.Г.**  
 ГНУ "Институт прикладной физики НАН Беларуси", Минск, Республика Беларусь

Достаточно часто в качестве информативного параметра, хорошо коррелирующего с физико-механическими свойствами металлоизделий  $\Xi_i \in \{E, \sigma, \sigma_{пр}, B, \dots\}$ , используется скорость той или иной моды  $C_{L,T,R}$ , где  $E$  - модуль Юнга,  $\sigma$  и  $\sigma_{пр}$  приложенное механическое напряжение и прочность на разрыв соответственно,  $B$  – твердость материала и др., а индексы относятся к подповерхностной продольной ( $L$ ), поперечной ( $T$ ) и поверхностной ( $R$ ) волне. Эти волны возбуждаются при углах падения ультразвуковой волны (УВ) на объект  $\beta_{L,T,R} = \arcsin(C_k/C_{L,T,R})$ .

Ввиду того, что скорость УВ (или ее гармоники) должны измеряться с точностью  $\sim 10^{-3}-10^{-4}$ , то необходимо устранить ряд факторов, влияющих на погрешность измерений, среди которых шумовой фон, вызванный появлением сопутствующих мод и переломлением в объекте базовой моды (рисунок 1). Этому вопросу и посвящена первая часть работы, в которой представлены расчетные и экспериментальные данные, позволяющие существенно нивелировать влияние шумового фона, вызванного ограниченными размерами объекта (волноводный эффект), а также наложением сопутствующей поверхностной моды на полезный (информативный) сигнал с огибающей в виде колокола и количеством осцилляций в нем  $m$ . В общем виде уравнение акустического тракта для представленной на рисунке 1 схемы прозвучивания объекта ограниченной толщины имеет вид

$$A \sim D_{и} D_{п} R_f F(s_1) F(s_2),$$

где  $D_{и}$  и  $D_{п}$  - коэффициенты звукопрозрачности УВ по амплитуде относительно границы ПЭП-объект и объект-ПЭП соответственно,  $R_f$  – коэффициент отражения от донной поверхности ( $z=h$ ).  $F(s_1)$  и  $F(s_2)$  – функции ослабления акустического луча с траекториями  $s_1$  и  $s_2$  - согласно схеме: излучающий преобразователь (ПЭП) → отражающая (донная) поверхность → приемный ПЭП, В частности, для устранения шумового фона вызванное однократным отражением от донной поверхности части потока информативной или сопутствующей моды

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / Под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.
2. Баев, А.Р. Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями. Ч. 1. Результаты экспериментальных исследований / А.Р. Баев, М.В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 3–17.

(распространяющейся вдоль поверхности) необходимо выполнение условий:

$$m/f \geq \lfloor (\sqrt{x_L^2 + h_L^2} + \sqrt{(1-x_L^2)^2 + h_L^2})n - 1 \rfloor / C, \quad (1)$$

$$m/f \geq L |n-1| / C, \quad (2)$$

где индекс  $L$  характеризует обезразмеривание по  $L$ ,  $C_A \in \{C_{L,T,R}\}$ ,  $n=C/C_A$ . Как показывает анализ зависимостей  $A\{R_f, D_{и}, D_{п}\}$ , при различных углах падения той или иной моды на донную поверхность, наиболее высокая интенсивность отраженной моды достигается преимущественно при  $x \sim L/2$ . Если  $m$  задано, то оценочное значение  $L$ , определяемое из (1 и 2), примет вид:

$$L_{\lambda} \approx L/\lambda \leq \mathfrak{Z} \pm (\mathfrak{Z}^2 + \mathfrak{R})^{0.5}, \quad \mathfrak{Z} = m(1-n^2)f^2, \quad (3)$$

$$\mathfrak{R} = (m^2 - 4n^2 h_L^2) (1-n^2)^{-1} f. \quad (4)$$

В случае, если зондирующей (информативной) волной является  $T$ -мода, а сопутствующая - продольная, то условие, при котором происходит наложение  $k$ -кратно отраженной продольной волны на  $m$ -й период осцилляции импульса поперечной ПВ, выполняется, если критическая толщина волновода

$$h^*_{\lambda} = 2 \left[ \sum_{k=0}^{k=2} a_k (L_{\lambda})^k \right]^{0.5} (m+1)^{-1},$$

где  $a_0=1$ ,  $a_1=1/2n$ ,  $a_2=3/4n^2$ .

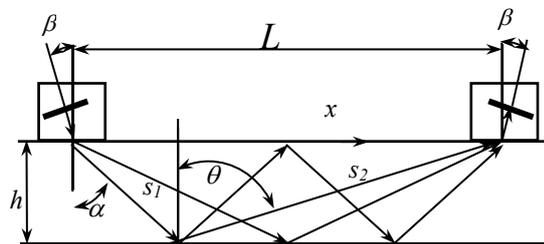


Рисунок 1 – Пояснение к возникновению шумового фона, создаваемого упругими волнами

Расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды той или иной моды от величины акустической базы и толщины волновода (металлической подложки) подобны представленным на рисунке 2. Значение  $L_{\lambda}^*$ , при котором происходит «расщепление» этих кривых,

представляет собой характерны параметр  $h_\lambda$ , являющийся максимальной акустической базой, обеспечивающей режим теневого прозвучивания, при котором можно пренебречь влиянием переотраженных сигналов на информативный импульс, используемый для определения скорости волны. Если же информативной волной является ПАВ, то наряду с возможным влиянием шума, создаваемого отраженными от донной поверхности сопутствующей продольной и поперечной модой, следует учесть отражения поверхностных волн от боковых границ объекта. Оценка условий нивелирования влияния этого фактора на измерительный тракт проводится указанным выше образом.

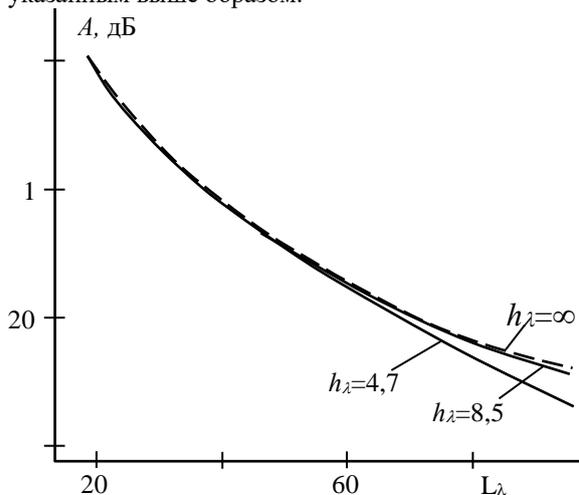


Рисунок 2 – Влияние толщины волновода (стальной пластины) на зависимость амплитуды L-моды от длины акустической базы при  $f = 5 \text{ МГц}$

Во второй части работы проводится численное и опытное моделирование процессов распространения ПАВ в металле с неоднородно упрочненным ТВЧ закалкой поверхностным слоем (УПС) (рис.3). Численные расчеты выполнены на основе использования формулы Оулдера

$$\Delta C_s(C_{s0})^{-1} \sim C_{s0} \int_{-\infty}^0 (-\Delta w^2 \Delta \rho u_i^* u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta P_{ijkl}) F(z) dz,$$

где  $w$  - абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой через упругое полупространство единичной ширины;  $\Delta P_{ijkl}$  - изменения упругих модулей;  $u_{k,l}$  - поле смещений в волне или тензор смещений;  $F(z) \sim \Delta B$ . Учитывается также тот факт, что

$$\{\Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1 \text{ и } \Delta C = C_R - C_{R0} \sim \Delta B = B(z) - B_0,$$

где  $C_R$  - скорость ПАВ на поверхности срезанного слоя УПС толщиной  $h = z$ , а индекс 0 соответствует  $z=0$ . Некоторые результаты численного моделирования и опытных данных представлены на рисунке 3, где приведены зависимости изменения  $C_R$  от толщины срезанного слоя УПС при разных частотах. Как видно, на данном этапе исследований наблюдается неплохое качественное соответствие между

данными эксперимента и расчетной модели. Интересно, что экспериментальные зависимости  $C_R(h)$ , приведенные на рисунке 3а, при  $\lambda_R > \delta$ , где  $\delta$  - глубина УПС, представляют линейную зависимость при  $h < (0,6-0,7)\delta$ . Причем характерный тангенс их наклона  $c_h = C/\Delta h$  с уменьшением частоты падает, а кривая 2 в окрестности максимума функции  $B(h)$  претерпевает четко выраженный излом, обусловленный особенностями изменения модуля Юнга, зависящего от твердости УПС. Т.о., использование дисперсионных характеристик  $C_R(f)$  является весьма важным для зондирования распределения по высоте свойств УПС. Необходимо отметить, что имеющееся численное различие между расчетными и опытными данными может быть преодолено: а) путем уточнения особенностей изменения твердости по глубине УПС; б) увеличением частотного диапазона зондирования волн; в) повышением качества акустического контакта.

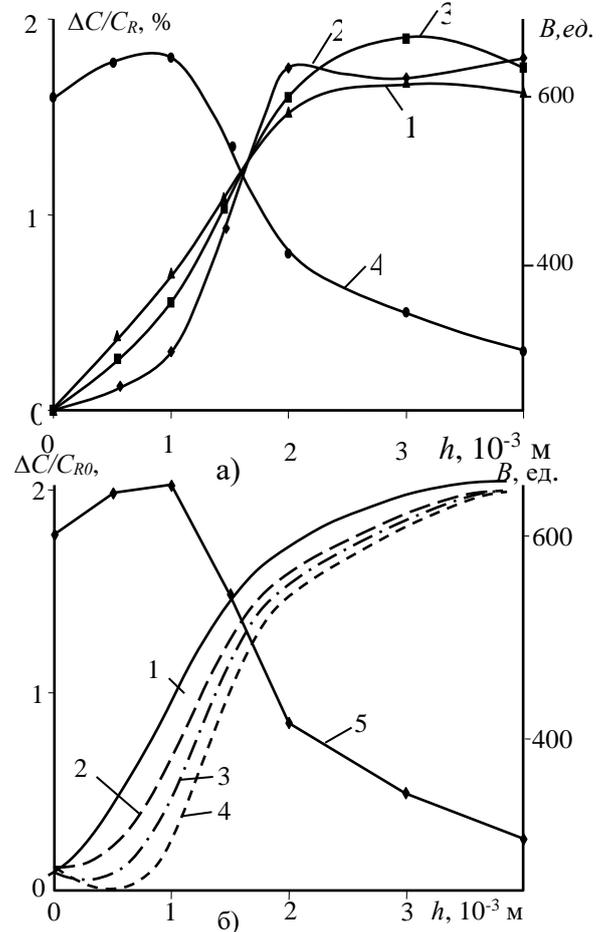


Рисунок 3 – Влияние глубины среза УПС  $h$  на скорость  $C_R$ : эксперимент (а) и расчет (б): а) 1, 2, 3 –  $\Delta C/C_R$ ; 4 - твердость  $B$ ;  $f$ , МГц=1(1); 1,8 (2); 3,8 (3); б) 1-4 –  $\Delta C/C_R$ ; 5 - твердость  $B$ ;  $f$ , МГц=1(1); 1,8 (2); 2,5 (3); 4 (4)

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.

**Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 535.015, 535.422

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОЦЕНКИ  
КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ****Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В., Старосотников Н.О.***Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь*

В процессе производства всех высокоточных приборов одним из важнейших этапов является оценка конечной точности его работы или проводимых прибором измерений. Из этого следует необходимость подготовки научно-технической базы для разработки оборудования оценки качества производимой продукции. В сфере высокоточного оптического приборостроения эта задача особенно актуальна и проектирование контрольно-юстировочных приборов занимает особое место во всем процессе изготовления изделий. Оптические системы исправляются на различные виды ошибок: хроматические и сферические aberrации, кому, астигматизм, дисторсию. Однако дисторсия является основной aberrацией, которая влияет на качество изображения при работе фотографических систем, предназначенных для фотограмметрических измерений.

Существует множество методов геометрической калибровки таких систем [1], к одним из самых эффективных можно отнести калибровку на основе электронного тест-объекта (рис.1). Сущность метода заключается в автоматическом попиксельном сравнении цифровых изображений тест-объекта и регистрирующей системы. Метод призван повысить качество проводимых измерений за счёт исключения ошибок оператора, путём точечного математического расчёта коэффициентов учитывающих все искажения оптической системы и стенда непосредственно в рабочем алгоритме. Также данный метод предусматривает наличие проработанного интерфейса программного обеспечения (ПО), позволяющего повысить наглядность и доступность различных функций проведения измерений (динамические тесты, оценка разрешающей способности и др.), выполнение которых на разрабатываемом стенде возможно на теоретическом уровне.

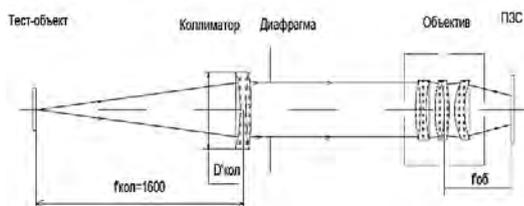


Рисунок 1 – Оптическая схема экспериментального стенда

Исходя из всего вышесказанного следует справедливость жестких требований к элементам разрабатываемого стенда, которые можно

разделить на следующие типы: оптические, электронные, оптико-электронные, механические. На этом этапе следует указать на различия при разработке экспериментального и рабочего стенда. В создании экспериментального образца не представляется возможным использование специально разработанных деталей и узлов, дорогостоящих покупных комплектующих. В связи с этим собственная точность и точность позиционирования элементов экспериментального стенда априори ниже тех же параметров стенда рабочего.

В качестве электронного тест-объекта используется IPS матрица (рис.2), параметры которой представлены в таблице 1. Допущением является форма субпикселей – в идеальном случае форма должна быть подобна квадрату или окружности, но последняя снижает эффективность расположения субпикселей по площади и уменьшает их плотность.

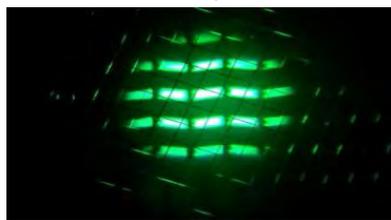


Рисунок 2 – Субпиксели IPS матрицы тест-объекта (зелёный цвет обусловлен лучшим восприятием человеческим глазом при проведении измерений)

Таблица 1. Параметры используемых матриц

Матрица	IPS	APS-C CMOS
Диагональ активной площадки, мм	178	26,81
Разрешение, пикс	1920×1080	5184×3456
Размер активных элементов, мкм	70×24	4.3×4.3
Чувствительность (яркость)	20..340 кд/м <sup>2</sup>	100..6400 ISO
Тип фильтра	RGB	RGBG
Динамический диапазон	8.5 evs	11,5 evs

Согласно функции Эйри мера разрешения идеальной оптической системы определяется как

$$\psi = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D},$$

где  $\psi$  – угловой предел разрешения, секунды;  $\lambda$  – длина волны, мкм;  $D$  – диаметр входного зрачка, мм.

Из чего следует рациональность создания электронного тест-объекта с элементами соответствующими коротковолновой области спектра для систем, рабочий спектральный диапазон которых включает эту область. Так как системы,

поверку которых планируется выполнять на разрабатываемом стенде, работают в мультиспектральном и панхроматических режимах, то для частных случаев может требоваться задание элементов тест-объекта разных участков спектра (видимый, инфракрасный диапазоны).

Для системы регистрации было решено использовать любительский фотоаппарат «CANON EOS 60D» с рабочим сенсором APS-C CMOS, характеристики которого представлены в таблице 1 [2], и фотообъективы «CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM» [3] и «CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II» [4] в качестве тестируемых систем.

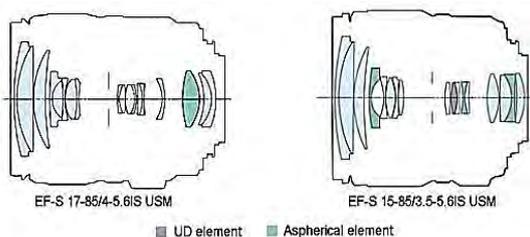


Рисунок 3 – Оптические системы фотообъективов: CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM и CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II

Выбор данной системы обусловлен следующими положениями:

1. Невозможность использования промышленных образцов высокоточных ОЭП.
2. Необходимость минимизирования погрешностей ориентации тестируемой оптической системы и приемного сенсора с возможностью замены тестируемых ОС при сохранении допусков отклонений.
3. Возможность получения изображений без автоматического редактирования и цветокоррекции (формат RAW).
4. Светосильная и точная оптика (относительно любительского сегмента рынка).

Использование двух объективов обусловлено возможностью относительной оценки чувствительности разрабатываемого метода – объективы со схожими параметрами одного производителя, при этом один из них (CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM) позиционируется как усовершенствованный – производитель заявляет о снижении влияния дисторсии за счёт использования асферических элементов в оптической схеме (рис.3).

УДК 535.24

## РЕФЕРЕНСНЫЕ СВЕТОДИОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАДИОМЕТРИИ

Данильчик А.В., Длугунович В.А., Ждановский В.А., Крейдич А.В., Луценко Е.В., Никоненко С.В.

*Институт физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Система обеспечения единства измерений оптической радиометрии в Беларуси и странах СНГ в настоящее время базируется в основном на введенных в 2015 г. стандартах ГОСТ 8.023-2014,

В ходе юстировки экспериментального и рабочего стендов также необходимо предусмотреть метод компенсации непараллельности тестируемого ОЭП и тест-объекта. Из источника [5] видны высокая эффективность использования автоколлимационного метода оценки и компенсации децентрировки, а также соблюдения изопланатизма. В условиях экспериментального стенда (относительно низкой точности) возможно использование автоколлимационного метода контроля с поверочным зеркалом, прикладываемым к объективу регистрирующей системы. В дальнейшем метод требует доработки принципов взаимного позиционирования элементов, одним из возможных решений может являться использование координатных MEMS датчиков, позволяющих выставлять параллельность плоскостей приёмной матрицы и тест-объекта с высокой точностью, центрирование системы – производить с помощью функции в ПО, суть которой заключается в сопоставлении центральных пикселей приемной матрицы с центральным элементом тест-объекта.

Таким образом, был проведен подбор компонентов экспериментального стенда, предложены методы контроля соответствия отклонений взаимной ориентации узлов, высказана направленность дальнейшей работы.

1. Кожевников Д.А. Методы геометрической калибровки оптико-электронных приборов / Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В., Старосотников Н.О. // 9-я МНТК «Приборостроение-2016». Минск: БНТУ, 2016. – С.332-334.
2. Цифровые зеркальные камеры EOS и компактные системные камеры. Canon EOS 60D. – 2017. [https://www.canon.ru/for\\_home/product\\_finder/cameras/digital\\_slr/eos\\_60d/](https://www.canon.ru/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_60d/)
3. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 17-85mm f/4-5.6 IS USM. – 2017. <https://www.canon.ru/lenses/ef-s-17-85mm-f-4-5-6-is-usm-lens/>
4. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II. – 2017. <https://www.canon.ru/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/>
5. Ежова, К.В. Разработка алгоритмов для компенсации децентрировок поверхностей в оптической системе на основе методов Гауссовой оптики / К.В. Ежова // Вестник II межвузовской конференции молодых ученых: сб. научн. Трудов. – СПб.: СПбГУИТМО. – 2005. – С.51-58.

ГОСТ 8.195-2013, ГОСТ 8.197-2013 и ГОСТ 8.205-2014. Эти стандарты распространяются на поверочные схемы для средств измерений соответственно световых величин непрерывного и

импульсного излучений, спектрометрических величин в диапазонах длин волн от 0,2 до 25 мкм и от 0,001 до 1,6 мкм, координат цвета и цветности, показателей белизны и блеска. В качестве элементов вторичных и (или) рабочих эталонов в этих стандартах указаны светодиоды (СИД) (или полупроводниковые излучатели).

Эти нововведения в определенной мере отражают прогресс в развитии СИД технологий. Следует отметить, что за последние 15 лет СИД и изделия на их основе в значительной мере вытеснили традиционные источники излучения с рынка светотехнических изделий местного и общего освещения, подсветки, а также сигнальной техники (светофоры, световая сигнализация). СИД излучают в видимом и ближнем ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра, но в отличие от видимого диапазона революционное развитие СИД в УФ диапазоне спектра (от 200 до 400 нм) еще только набирает силу. Большие перспективы применения УФ СИД просматриваются в: криминалистике, идентификации химических веществ; проверке подлинности документов и денег; полиграфии и производстве изделий из фотополимеров; люминесцентном анализе и дефектоскопии; тепличном хозяйстве, животноводстве, и т.д. Но особенно эффективно применение излучения УФ СИД может быть в медицине и санитарии, косметологии и пищевой промышленности, где используется биологическое действие УФ излучения. Основными преимуществами СИД по сравнению с традиционными источниками излучения являются: эффективность, долгий срок службы, экологичность, высокая устойчивость к внешним воздействиям, электро- и взрывобезопасность. Кроме того, современные СИД имеют компактные размеры, позволяющие создавать светотехнические изделия очень сложной конфигурации, большой выбор цветов свечения, широкий динамический диапазон интенсивностей излучения и практически произвольную форму пространственного распределения излучения.

Очевидно, что при столь широком распространении СИД и изделий на их основе, эффективность, качество и безопасность работ с применением СИД, особенно в УФ диапазоне спектра, в значительной мере определяется качеством измерений их оптических характеристик и параметров. Однако в настоящее время метрологическое обеспечение в области оптической радиометрии столкнулось с рядом проблем, обусловленных особенностями излучения СИД. К сожалению, следует констатировать, что в настоящее время на международном уровне еще не разработаны не только убедительные методики измерений оптических характеристик СИД, но даже номенклатура измеряемых параметров и характеристик не нормирована. Разработанные Международной

комиссией по освещению (CIE) в 2007 г рекомендации, безусловно, смягчили ситуацию с измерением характеристик СИД, но по-прежнему не лишены недостатков [1 – 3]. Поэтому в технических комитетах CIE продолжается работа по разработке рекомендаций для измерений оптических характеристик: семейств (типов) СИД (ТК 2-50); высокоомощных СИД при заданных температурах р-п перехода (ТК 2-63); при проведении высокоскоростных испытаний при производстве СИД (ТК 2-64); криволинейных и гибких СИД (ТК 2-75); для оценки фликкерных эффектов (ТК 2-76) и др. Следует особо отметить создание в 2016 г. нового комитета CIE ТК 2-87, основной целью которого является подготовка рекомендаций по методам характеристики и калибровке широкополосных УФ радиометров в спектральном диапазоне от 320 до 420 нм для промышленных применений. Основным способом реализации этой цели является стандартизация требований к референсному твердотельному источнику излучения и стандартизация процедуры его применения при калибровке радиометров.

Первоначальные рекомендации для референсных светодиодных источников излучения (РСИИ) на основе СИД [1] были следующими [1] – референсные (эталонные) СИД должны иметь пространственное и спектральное распределения излучения, подобные испытываемому СИД, пространственное распределение силы света референсных (эталонных) СИД должно быть в пределах  $\pm 10^\circ$  от оси гладким и примерно равномерными, а если спектральные условия не соблюдаются, то необходимо проводить коррекцию результатов измерений на спектральное рассогласование СИД. К основным недостаткам такой конструкции референсных светодиодных источников излучения (РСИИ) можно отнести применение хотя и распространеного, но старого типа СИД, который характеризовался низким уровнем мощности (порядка 20 мВт). Кроме того, температура СИД и ток инжекции только контролировались, а не задавались, и именно поэтому такая конструкция изначально предполагала наличие флуктуаций интенсивности оптического излучения, обусловленных нестабильностью тока и инжекции и температуры СИД. Отметим, что в ГОСТ 8.023–2014, ГОСТ 8.195–2013, ГОСТ 8.197–2013 и ГОСТ 8.205–2014 рекомендации для РСИИ фактически отсутствуют.

Несмотря на указанные недостатки, на рынке появились эталонные (референсные) СИД разных производителей, созданные на основе рекомендаций [1], в том числе и достаточно известных, например, Instrument Systems (Германия). Что обусловлено крайней востребованностью точного определения оптических характеристик СИД и изделий.

Одновременно возник вопрос о корректности оценки оптических характеристик СИД, применяя традиционные подходы их измерений. В ряде исследований было показано [2 - 6], что если выполняются измерения интегральных величин (силы света, светового потока, яркости и др.), то влиянием спектрального фактора [4] можно пренебречь. Вместе с тем, такие особенности СИД как стабильность и широкий диапазон мощности излучения, хорошая воспроизводимость основных оптических характеристик СИД излучателей весьма перспективны с точки зрения создания на их основе эталонных (референсных) источники излучения для применения в различных областях оптической радиометрии [5, 7].

Кратко остановимся на наиболее перспективных разработках РСИИ. Практически одновременно NIST (США) и Институтом физики НАН Беларуси были предложены другие конструкции референсных СИД [7-10]. В РСИИ [7] гомогенизация пространственного распределения излучения в плоскости излучающей гетероструктуры осуществляется при помощи волноводного элемента. С помощью линзы производится Фурье-преобразование изображения торца волноводного гомогенизатора в пространственно-угловое распределение излучения. Это обеспечивает относительно небольшой регулируемый (в случае изменения фокусного расстояния линзы) угол расходимости пучка излучения с достаточно высокой однородностью его интенсивности, что делает данный РСИИ не похожим на большинство современных мощных СИД, являющихся, как правило, косинусными источниками. К преимуществам, по сравнению с прототипом CIE, можно также отнести обеспечение постоянной температуры корпуса СИД с помощью Пельтье-элемента.

В разработанных Институтом физики НАН Беларуси РСИИ однородная пространственная засветка производится при помощи цилиндрического и полусферического рассеивателей. Пространственно-угловое распределение излучения в этих источниках, близкое к распределению косинусного источника, что делает предложенные РТТИИ подобными большинству выпускаемых мощных СИД [8-10].

УДК 681

#### БЕЗОПАСНЫЙ ДЛЯ ГЛАЗ КОМПАКТНЫЙ ЛАЗЕР БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Дейнека Р.В.<sup>1</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Мальцев В.В.<sup>2</sup>, Леонюк Н.И.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Кафедра кристаллографии и кристаллохимии МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Твердотельный лазер на основе монокристаллов иттрий-алюминиевого и гадолиний-алюминиевого боратов (Er,Yb:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> и Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>) – синтетических структурных аналогов минерала

Кроме того, следует отметить, что для полусферического РСИИ спектры излучения не имеют спектрального сдвига при любых углах излучения, а неравномерность интенсивности светового пятна (45 мм) на расстоянии 0,5 м не превышает 1,5 %, что является значимым преимуществом такой конструкции.

Таким образом, разработка и внедрение в метрологическую практику РСИИ, обеспечивающих высокостабильное и относительно равномерное спектральное распределение мощности излучения во всем спектральном диапазоне при достаточно высокой мощности излучения, может существенно повысить точность и качество метрологических работ в области оптической радиометрии.

1. CIE 127:2007 Technical report CIE. Measurement of LEDs. 2nd edition Publication. – Vienna, CIE Central Bureau, 2007 – 32 p.
2. Influence of spatial characteristics of solid state light sources on results of measurements of their photometric and radiometric properties / S.V.Nikanenka [et al.] // CIE 216:2015 Proc. 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 28 June – 4 July 2015. – Manchester: CIE, 2015. – Vol. 1, P. 2. – P. 1389–1395.
3. Гомбош, К. Освещение светодиодами как проблема фотометрии и колориметрии / К. Гомбош, Я. Шанда // Светотехника. – 2009. – № 2. – С. 11 – 19.
4. Погрешности измерения освещенности создаваемой светодиодами / Д.В. Скумс [и др.] // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: тезисы докладов XIX науч.-техн. конф., Москва, 16-19 апреля 2013 г. – М.: Логос. 2013. – С. 38–40.
5. Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry / T. Pulli [et al.] // Light: Science & Applications. – 2015. – №. 4. – P. 1–7.
6. Влияние спектральной чувствительности фотометров на измерение силы света белых светодиодов / С.В. Никоненко [и др.] // МЕТРОЛОГИЯ-2010: наукові праці VII Міжнар. науково-техніч. конф. Харків, 12-14 жовтня 2010 р.: в 2 т. / ННЦ «Інститут метрології». – Харків, 2010. – Т. 2. – С. 19–22.
7. Broadband Radiometric LED Measurements / G.P. Eppeldauer [et al.] // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 9954. – P. 99540J-01–99540J-15.
8. Эталонный монохромный светодиод: пат. № 115889, Российская Федерация, МПКG01J1/00 / А. В.Данильчик, Е.В.Луценко, С.В.Никоненко; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № RU 115889; заявл. 28.12.2011.
9. Influence of spatial characteristics of solid state light sources on results of measurements of their photometric and radiometric properties / S.V.Nikanenka [et al.] // CIE 216:2015 Proc. 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 28 June – 4 July 2015. – Manchester: CIE, 2015. – Vol. 1, P. 2. – P. 1389–1395.
10. S.V. Nikanenka et al., Reference hemispherical UVA LED source /S.V.Nikanenka [et al.]/ Proc. NEWRAD 2017, Tokyo 13 - 16 June, 2017, ed. LOC of NEWRAD 2017, P. 114-115.

хантита – является высокоэффективным малогабаритным источником излучения с различными длинами волн (1520, 1531, 1550, 1602 нм) в условно безопасном для органов зрения спектральном

диапазоне. Принимая во внимание высокую теплопроводность, твердость, лучевую прочность, спектроскопические свойства и нелинейно-оптические характеристики этого материала, он может быть использован в качестве активной среды лазера, излучающего в области 1.5–1.6 мкм [1]. Уникальные характеристики полученных кристаллов позволяют существенно уменьшить объем активного элемента и всего устройства в целом (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид Er,Yb:GAB лазера работающего в непрерывном режиме

Надежная конструкция лазера, наряду с высокими выходными характеристиками, такими как выходная мощность, дифракционно-ограниченная расходимость пучка и линейная поляризация (таблица 1) излучения обеспечивает возможность его широкого применения как в медицине, так и в оптических системах различного назначения

Таблица 1 – Характеристики Er,Yb:GAB лазера, работающего в непрерывном режиме

Характеристика	Модель		
	CW-0.5-1520	CW-0.5-1531	CW-0.5-1555
Длина волны, нм	1520	1531	1555
Выходная мощность, мВт	500	500	500
Расходимость, мрад	< 9	< 9	< 9
Поперечный профиль пучка	TEM <sub>00</sub>	TEM <sub>00</sub>	TEM <sub>00</sub>
Поляризация	Линейная, > 100:1	Линейная, > 100:1	Линейная, > 100:1
Стабильность выходной мощности, % СКО, 1 час	< 1	< 1	< 1
Габаритный размеры (ШxВxД, мм <sup>3</sup> )	80x90x180	80x90x180	80x90x180
Охлаждение	Воздушное	Воздушное	Воздушное

Такие «хантитовые» лазеры со сверхкороткими импульсами и частотой следования в десятки гигагерц (рисунок 2) предназначены также для телекоммуникационных систем большой емкости, оптической локации и дальнометрии [2].

Кроме того, создание лазерного излучателя с уникальными характеристиками позволит разработать приборы нового класса, обладающие улучшенными эксплуатационными характеристиками (таблица 2) и меньшей стоимостью для применений, в частности, в качестве дальномеров для

беспилотных летательных аппаратов, работающих в режиме накопления сигнала, а также в воздушной навигации и для зондирования атмосферы, в системах целеуказания и оптоэлектронного противодействия, поскольку попадают в «окно прозрачности» атмосферы.



Рисунок 2 – OEM импульсный лазер на основе кристалла Er,Yb:GAB

Таблица 2 – Характеристики Er,Yb:GAB лазера работающего в импульсном режиме

Характеристика	Значение
Длина волны, нм	1550
Энергия импульсов, мкДж	*30 **10
Частота следования импульсов, кГц	*10 **30
Длительность импульсов, нс	< 5
Поперечный профиль пучка	TEM <sub>00</sub>
Габаритный размеры (ДиамД, мм)	25.4x40
Охлаждение	Воздушное

Осциллограммы одиночного импульса и последовательности импульсов представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

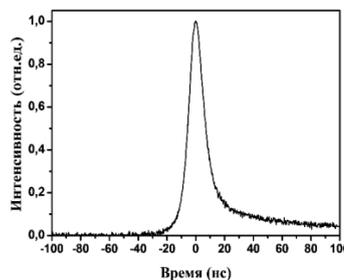


Рисунок 3 – Осциллограмма одиночного импульса

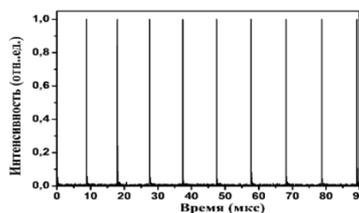


Рисунок 4 – Осциллограмма последовательности импульсов

Использование лазерного диода для накачки увеличивает время наработки на отказ предлагаемого лазера до 100 000 часов. Для него не требуется дополнительного водяного охлаждения, при этом в процессе работы лазера отсутствуют вибрации. Он способен конкурировать с образцами ведущих мировых компаний.

1. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, and N.V. Kuleshov // Optics Letters, 38, 2446 (2013).

2. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk and N.V. Kuleshov // Optics Letters, 41, 918 (2016).

УДК 535.317

**АБЕРРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ДВУХЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА С ТРЕМЯ ОТРАЖЕНИЯМИ**

**Аргюхина Н.К.<sup>1</sup>, Самбрано Л.Ф.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск Республика, Беларусь

<sup>2</sup>Национальный центр оптических технологий, Мериды, Венесуэла

В последнее время большое распространение получили зеркальные системы из-за отсутствия хроматических aberrаций при любых апертурах и фокусных расстояниях. Они используются в разнообразных областях науки и техники.

Развитие схемных решений зеркальных систем идет по пути улучшения оптических характеристик: увеличение угловых полей, сокращение габаритов, повышение качества изображения, а также точность и технологичность изготовления отражающих поверхностей. Окончательный выбор схемы с различным числом зеркальных элементов всегда осуществляется для конкретной задачи. Накоплен значительный потенциал по разработке и исследованию двухзеркальных систем [1].

В данной работе представлено проектирование двухзеркального объектива с тремя отражениями от двух параболических зеркал, причем используется двойное отражение от главного зеркала. Такой объектив построен на основе телескопической системы Мерсенна [2]. Абберационный анализ показал, что исследуемая композиция обладает исправлением сферической aberrации, соблюдением условия синусов Аббе и исправлением астигматизма при наблюдении телецентрического хода главных лучей в пространстве между обоими зеркалами.

Схема объектива показана на рисунке 1. Второе зеркало имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей. Деформация для каждой отражательной поверхности:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -1$ .

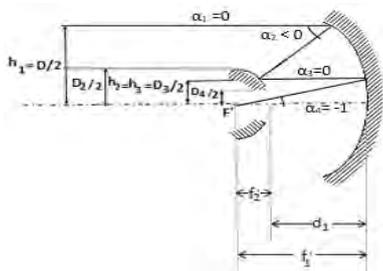


Рисунок 1 – Схема двухзеркального объектива с ходом первого параксиального луча

Проектирование зеркального объектива проведено в два этапа: габаритный расчет и aberrационный (оценка коэффициентов Зейделя). При этом применим алгебраический метод проектирования [1]. Сначала установлены

условия нормировки для первого параксиального луча:

$$\alpha_1 = \alpha_3 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_4 = -1, h_1 = 1..$$

Отметим, что наибольший эффект укорочения получается при следующем дополнительном условии  $f_1/D=0,25$ .

Получим сводки формул для первого этапа параметрического расчета:

$$\begin{aligned} -1 &= f' = f'_1 \cdot \Gamma, \\ \frac{D}{D_2} = \frac{f'_1}{f'_2} &= \Gamma, \quad \frac{D_2}{D_3} = \Gamma, \quad \frac{D_3}{D_4} = \Gamma, \\ d_1 &= f'_1 - f'_2, \quad f'_1 = -\frac{1}{\Gamma}, \quad f'_2 = -\frac{1}{\Gamma^2}, \\ d_1 &= -\frac{\Gamma-1}{\Gamma^2}, \quad h_2 = h_3 = \frac{1}{\Gamma}. \end{aligned}$$

Значение свободного коррекционного параметра  $\alpha_2$ , влияющего на конструктивное решение системы можно определить с помощью следующей формулы:

$$\alpha_2 = -\frac{h_2-h_1}{d_1} = -\Gamma.$$

Формулы для расчета величин радиусов зеркал:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2} = -\frac{2}{\Gamma}, \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2} = -\frac{2}{\Gamma^2}, \quad r_3 = -\frac{2h_2}{\alpha_4}.$$

Из-за двойного отражения главного зеркала имеем , т.е. .

В процессе проектирования данного объектива возникают некоторые дополнительные условия.

Рассчитанная система имеет высокое относительное отверстие  $D/f= 1:0.5$ , но малое поле зрения (порядка  $2\omega=12'$ ).

Расчетные значения конструктивных параметров системы (радиусов кривизны, диаметров и расстояний между поверхностями) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Конструктивные параметры системы,мм, (когда  $\alpha_2 = -2$ )

$R_1=R_3$	$R_2$	$d_1$	$D$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
-2000	-500	-750	2000	1000	500	250

На втором этапе получены коэффициенты aberrаций третьего порядка, которые описываются пятью уравнениями:

$$\begin{aligned} V &= V_0 = 0, \\ K &= K_0 - tB_0 = K_0, \\ C &= C_0 - 2tK_0 + t^2B_0, \\ D - C &= D_0 - C_0, \\ E &= E_0 - t(2C_0 + D_0) + 3t^2K_0 - t^3B_0, \end{aligned}$$

Результаты расчета коэффициентов абберации представлена в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты 3-го порядка

B	K	C	D
0	$-\frac{1}{4}$	0	1

Коэффициенты  $B = C = 0$ , т.е. исправлены сферическая абберация и астигматизм. Присутствуют абберация комы (K), кривизна изображения (D), а также дисторсия.

Абберационные характеристики зеркального объектива с двойным отражением от главного зеркала, рассчитанные в ППП Oral, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Абберации (расчеты в ППП Oral)

m	$\Delta S'$	$\Delta Y'$	$\eta, \%$	$Z'_m$	$Z'_s$	$\Delta Y', \%$
1	0.000	0.000	0.389	0.148	0.139	0.007

$\Delta S'$ ,  $\Delta Y'$  - соответственно продольная и поперечная сферическая абберация;  $\eta, \%$  - неизопланатизм;  $\Delta Y', \%$  - дисторсия; - астигматические отрезки.

На рисунках 2 и 3 показано компьютерное моделирование зеркального объектива и диаграмма пятна рассеяния в программной среде Zemax: габаритная схема с ходом лучей и диаграмма пятна рассеяния.

Таким образом получен анастигматический светосильный объектив с большим относительным отверстием, нои малым полем зрения. Такой объектив можно использовать для солнечных телескопов.

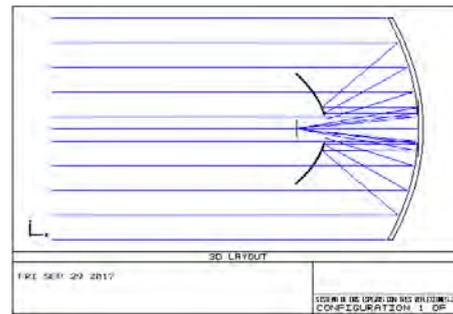


Рисунок 2 – Моделирование анастигматического двухзеркального объектива с тремя отражениями в ППП Zemax

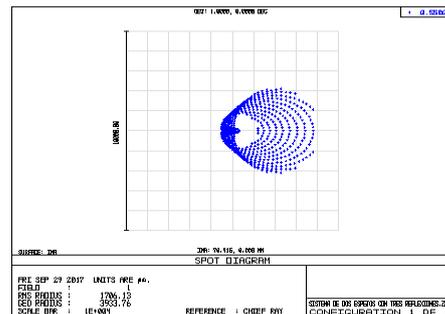


Рисунок 3 – Диаграмма пятна рассеяния анастигматического двухзеркального объектива ( $2\omega=12^\circ$ ) в ППП Zemax

1. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2009. – 309 с.
2. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике: Расчет, изготовление и контроль. / М.М. Русинов, 4-е изд.– М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 296 с.

УДК 621.372.821.1

### ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ЭПИТАКСИАЛЬНОМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СЛОЕ $\text{Er}_{1.3} \text{at.}\% : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ С РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКОЙ

Дернович О.П.<sup>1</sup>, Курильчик С.В.<sup>2</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Кравцов А.В.<sup>3</sup>, Гурецкий С.А.<sup>3</sup>, Колесова И.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, UK

<sup>3</sup>ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

В работе [1] нами сообщалось об успешном росте экспериментального образца эпитаксиального слоя  $\text{Er}_{0.01} : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.148} \text{Y}_{0.642} (\text{WO}_4)_2$  на подложке  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ , состав которого, обеспечивающий согласование параметров кристаллической решетки слоя и подложки, был определен с помощью разработанной математической модели, позволяющей рассчитывать параметры кристаллической ячейки и показатель преломления слоя  $\text{KGd}_x \text{Yb}_y \text{Y}_{(1-x-y)} (\text{WO}_4)_2$  при различном соотношении ионов Gd и Yb.

В настоящее время методом жидкофазной эпитаксии был получен новый образец монокристаллического слоя состава  $\text{Er} : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$  на подложке из кристалла  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ , на котором впервые среди эпитаксиальных кристаллических слоев вольфраматов,

легированных ионами эрбия, реализована лазерная генерация.

Отполированный образец слоя толщиной 180 мкм (вдоль кристаллографической оси b) был вырезан вдоль осей оптической индикатрисы кристалла  $N_m$  и  $N_g$ . Снимок слоя, сделанный через микроскоп Полам РП-1 (ЛОМО), представлен на рисунке 1.

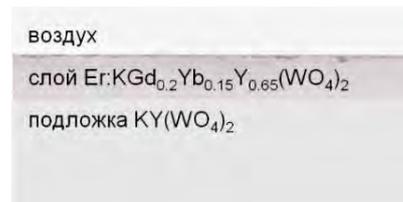


Рисунок 1 – Фотография монокристаллического слоя  $\text{Er} : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ , выращенного на кристалле  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$

На спектрофотометре Cary 5000 (Varian) был получен спектр поглощения образца, измеренный в спектральном диапазоне 1,45–1,65 мкм для излучения, поляризованного вдоль осей оптической индикатрисы  $N_m$  и  $N_g$ . На основании сравнения спектров поглощения слоя с литературными данными для объемного кристалла  $\text{Er:KY(WO}_4)_2$  [2], было установлено, что концентрация ионов  $\text{Er}^{3+}$  в образце составляет ~1.3 ат.%.

Исследование кинетики затухания люминесценции верхнего лазерного уровня  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  на длине волны 1570 нм проводилось при возбуждении ионов  $\text{Yb}^{3+}$  лазерными импульсами длительностью 20 нс с длиной волны 975 нм. Кривая затухания люминесценции (рис. 2) хорошо аппроксимировалась моноэкспоненциальной зависимостью с характерным временем жизни 3,4 мс.

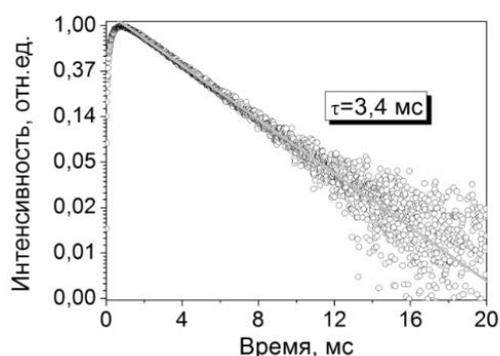


Рисунок 2 – Кинетика затухания люминесценции монокристаллического слоя  $\text{Er}(1.3 \text{ ат.}\%):\text{KGd}_{0.2}\text{Yb}_{0.15}\text{Y}_{0.65}(\text{WO}_4)_2$  в области 1,5 мкм

Лазерные эксперименты в режиме непрерывной генерации проводились в четырехзеркальном резонаторе. Схема эксперимента представлена на рисунке 3. Монокристаллический слой  $\text{Er}(1.3 \text{ ат.}\%):\text{KGd}_{0.2}\text{Yb}_{0.15}\text{Y}_{0.65}(\text{WO}_4)_2$  на подложке  $\text{KY(WO}_4)_2$ , вырезанный вдоль оси  $N_g$  длиной 7,5 мм, использовался в неволноводном режиме: излучение накачки и генерации проходило внутри слоя без полного внутреннего отражения на границах раздела.

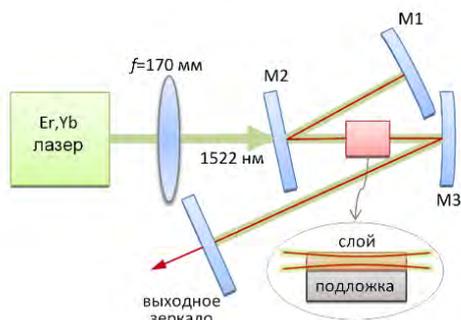


Рисунок 3 – Схема лазерной экспериментальной установки для исследования генерационных характеристик монокристаллического слоя  $\text{Er}(1.3 \text{ ат.}\%):\text{KGd}_{0.2}\text{Yb}_{0.15}\text{Y}_{0.65}(\text{WO}_4)_2$

На обе рабочие поверхности слоя и подложки были нанесены просветляющие покрытия, обесп-

печивающие минимальные потери в спектральном диапазоне 1500-1650 нм. Активный элемент был закреплен на медном теплоотводе, охлаждаемом вентилятором. Резонансная накачка активной среды непосредственно на излучающий уровень  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  проводилась с помощью коммерчески доступного  $\text{Er,Yb}$ -лазера (UAB Optogama), излучающего на длине волны 1522 нм. Линейно поляризованное излучение накачки с близким к Гауссовому профилю ( $M^2 < 1,2$ ) фокусировалось сферической линзой с фокусным расстоянием 170 мм в пятно диаметром 50 мкм (по уровню интенсивности  $1/e^2$ ). Резонатор состоял из двух сферических вогнутых зеркал M1 и M3 с радиусом кривизны 150 и 75 мм, соответственно, которые обеспечивали высокое отражение на длинах волн 1500-1650 нм, поворотного зеркала M2 и плоского выходного зеркала. В роли входного зеркала выступало плоское зеркало M2, которое характеризовалось высоким коэффициентом пропускания на длине волны 1522 нм и высоким коэффициентом отражения для диапазона длин волн 1600–1650 нм. Резонатор был рассчитан таким образом, чтобы диаметр моды резонатора внутри активного слоя был равен диаметру перетяжки пучка накачки. Выходное зеркало было частично отражающим на длине волны 1522 нм, что обеспечивало второй проход излучения накачки через активный кристалл с таким же диаметром пучка.

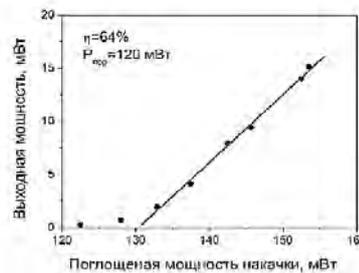


Рисунок 4 – Выходные характеристика лазера на основе монокристаллического слоя  $\text{Er}(1.3 \text{ ат.}\%):\text{KGd}_{0.2}\text{Yb}_{0.15}\text{Y}_{0.65}(\text{WO}_4)_2$

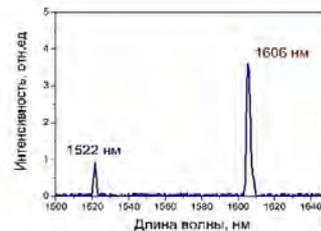


Рисунок 5 – Спектр генерации лазера на основе монокристаллического слоя  $\text{Er}(1.3 \text{ ат.}\%):\text{KGd}_{0.2}\text{Yb}_{0.15}\text{Y}_{0.65}(\text{WO}_4)_2$  и прошедшего излучения накачки

В данной конфигурации экспериментальной установки впервые была получена непрерывная генерация в эпитаксиальном кристаллическом слое калий-иттриевого вольфрамата, легированного ионами эрбия. Зависимость выходной мощности лазерной генерации в пленке

$\text{Er}(1.3\text{ат.}\%):\text{KGd}_{0.2}\text{Yb}_{0.15}\text{Y}_{0.65}(\text{WO}_4)_2$  от поглощенной мощности накачки для выходного зеркала лазера с пропусканием 2% на длине волны генерации изображена на рисунке 4.

Изменение мощности накачки осуществлялось с помощью вращающегося нейтрального фильтра переменной плотности так, что параметры излучения накачки внутри активного элемента оставались неизменными. Поглощенная мощность накачки измерялась в условиях генерации, с учетом второго прохода накачки внутри слоя. Наибольшее значение выходной мощности составило 16 мВт на длине волны 1606 нм. Дифференциальная эффективность генерации по поглощенной мощности накачки достигала 64%, порог генерации составил 120 мВт. Спектр генерируемого лазерного излучения наряду с прошедшим излучением накачки был

зарегистрирован с помощью спектрометра APE WaveScan и представлен на рисунке 5.

Полученное значение дифференциальной эффективности генерации превосходит результат, достигнутый ранее с объемным кристаллом  $\text{Er:KY}(\text{WO}_4)_2$  [2]. Это свидетельствует о высоком оптическом качестве выращенного слоя и демонстрирует его пригодность для применения в планарном волноводном лазере.

1. Изготовление монокристаллического слоя  $\text{Er:KGd,Yb,Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$  для планарных волноводных лазеров / О.П. Дернович, С.В. Курильчик, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.А. Гурецкий, И.М. Колесова // 9-ая международная научно-техническая конференция «Приборостроение 2016», Минск, 23–25 ноября 2016 г. / пред. редкол. Гусев О.К. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 308-310.
2. In-band pumped room-temperature  $\text{Er:KY}(\text{WO}_4)_2$  laser emitting around 1.6  $\mu\text{m}$  / K. Gorbachenya [et.al.] // Laser Physics. – 2013. – Vol.23. – P. 125005.

УДК 681.785.554

## СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ МНОГОЩЕЛЕВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.

Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

Спектроскопия с пространственным разрешением (СПР) широко используется в дистанционном зондировании земной поверхности, медицине, сельском хозяйстве, биологии и других областях. Во многих из приложений наблюдаемые объекты нестационарны, поэтому особый интерес представляет разработка подходов с малым временем регистрации, в том числе и обеспечивающих получение полного куба данных  $I(x,y,\lambda)$  в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [1], или мгновенная гиперспектроскопия – МГС).

Одним из вариантов реализации МГС является формирование проекции куба данных на двумерный фотодетектор как набора спектров от совокупности пространственно отфильтрованных фрагментов объекта (функциональный аналог множества входных щелей дисперсионного спектрального прибора). Таким пространственным фильтром может являться матрица микролинз либо маска, содержащая множество расположенных регулярным образом отверстий [2]. В подобных приборах в качестве дисперсионного элемента обычно используются призмы невысокой дисперсии. При этом если рабочий спектральный диапазон многощелевого дисперсионного спектрометра (МДС) широк, то проблемой становится сильная спектральная зависимость угловой дисперсии призмы. Использование составных призм, скомбинированных в установке с вычитанием дисперсии, позволяет ослабить спектральную зависимость, однако при этом неизбежно существенное снижение общей дисперсии, которая может оказаться недостаточной для получения от отдельных входных щелей

спектров даже небольшой длины в плоскости фотоприемника МДС. Использование дифракционной решетки обеспечивает пренебрежимо малую спектральную вариацию угловой дисперсии даже в широком спектральном диапазоне. Однако установка дифракционной решетки в параллельном пучке, формируемом коллиматорным объективом спектрометра, неприемлема для МДС из-за неэффективного использования площади фотоприемника, так как на детекторе отображаются близко расположенные спектры 0-го и  $\pm 1$ -го порядков.

В настоящей работе предлагаются варианты схемных решений МДС с пропускающей дифракционной решеткой, в которых устранена проблема нежелательных порядков, а также обеспечивается возможность оперативного варьирования дисперсии смещением дифракционной решетки вдоль оптической оси. Подход предусматривает расположение пропускающей дифракционной решетки  $G$  вблизи щелевой маски  $M$  в неколлимированном пучке, в то время как изображение на детекторе  $P$  формируется объективом  $L$ , находящимся на удалении от решетки (рисунок 1 а). Выбором числовой апертуры формирующих изображение на маске пучков и диаметра объектива  $L$  можно блокировать прохождение пучков всех порядков дифракции  $m$  кроме первого. Линейная дисперсия такого спектрометра

$$\frac{dl}{d\lambda} = h \frac{d\varphi}{d\lambda} \frac{l}{f} = h \frac{m}{t \cos \beta} \frac{l}{f},$$

где  $h$  – расстояние от маски до решетки,  $\frac{d\varphi}{d\lambda}$  – угловая дисперсия решетки,  $\frac{l}{f}$  – увеличение системы,  $m$  и  $\beta$  – порядок и угол дифракции,  $t$  – период решетки. К примеру, для решетки с 300 штр./мм при  $h = 5$  мм и нормальном падении для первого порядка при дисперсии  $1,5 \times 10^{-3}$  мм/нм изображение спектрального интервала  $\Delta\lambda = 300$  нм имеет длину 450 мкм.

Приближенная оценка показала, что вклад aberrаций, вносимых дифракционной решеткой при работе в неколлимированных пучках, в размер кружков рассеяния не является решающим: для решетки 300 штр./мм при  $NA = 0,05$  он не превышает 10 мкм. В то же время, aberrации объективов имеют гораздо большее влияние на характеристики изображения. Так, численное моделирование (здесь и далее оно проводилось в программе ZEMAX®) схемы рисунка 1 а с одним объективом Nikon Nikkor AF 50 mm (при увеличении  $0,5 \div 2$ ) показало неудовлетворительные результаты по размерам кружков рассеяния. Фотообъектив оптимизирован для работы с объектами, расстояние до которых много больше расстояния до изображения. В связи с этим предложен и проанализирован вариант схемы с двумя объективами L1 и L2,

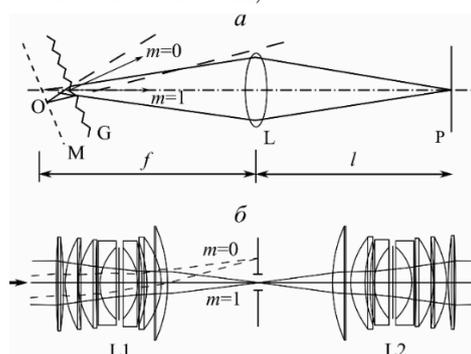


Рисунок 1 – Принципиальная схема многощелевого спектрометра с дифракционной решеткой (а) и схема использования системы из двух объективов для улучшения разрешения (б), в последнем случае указано прохождение осевых лучей пучков. Пояснения см. в тексте

заменяющими объектив L и образующими симметричную телецентрическую систему (рисунок 1 б), в которой оси отклоненных дифракционной решеткой пучков от разных точек поля для средней длины волны рабочего диапазона параллельны оптической оси объектива. При этом диафрагма, блокирующая порядки дифракции, располагается в плоскости, перпендикулярной общей оптической оси и являющейся фокальной для обоих объективов. Расчет показывает, что такая блокировка порядков реализуема с ограниченной числовой апертурой, к примеру, при указанных выше параметрах она обеспечивается при  $NA < 0,05$ . Проведено численное моделирование системы, построенной на базе объективов Nikon Nikkor AF

50 mm 1.4D. Изображение на маске формирует 4-линзовый микроскопный объектив МО (увеличение  $\sim 8,5$  раз). Диаметр рабочего поля изображения 16 мм, что соответствует диаметру поля в предметной плоскости МО 1,95 мм. Для коллимирования осей пучков от разных точек поля после прохождения МО использована плоско-выпуклая линза. Размер щелей в маске  $5 \times 20$  мкм, толщина ее подложки 2 мм, толщина пропускающей дифракционной решетки 2 мм (все стекла – BK7). Рабочий спектральный диапазон 405–700 нм. Результаты показывают, что полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии  $\Delta l \leq 15$  мкм (лишь для края диапазона в отдельных точках  $\Delta l \leq 20$  мкм), что соответствует спектральному разрешению на уровне 10 нм. Число разрешаемых пространственных элементов определяется паттерном щелевой маски и доходит до  $2 \times 10^4$ .

Разработана схема МДС на основе зеркальных объективов (внеосевые параболы), благодаря чему рабочий спектральный диапазон расширяем до  $\sim 0,3$ –2 мкм (ограничения обусловлены полосой пропускания кварцевых рефрактивных элементов). Схема включает два зеркальных объектива в симметричной телецентрической установке, в общей фокальной плоскости которых расположена диафрагма, блокирующая порядки дифракции (подход, аналогичный рефрактивной системе рисунка 1, б).

Проведено численное моделирование со следующими параметрами объективов: угол отклонения оптической оси  $30^\circ$ , диаметр 50,8 мм, радиус кривизны 254 мм, эффективное фокусное расстояние 136,12 мм. Для коллимирования осей пучков от разных точек поля после прохождения МО использована плоско-выпуклая кварцевая линза, подложка маски и пропускающая дифракционная решетка также кварцевые. Спектральный рабочий диапазон 450–750 нм, дисперсия  $\sim 1,2 \times 10^{-3}$  мм/нм.

Результаты моделирования показали, что полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии преимущественно  $\Delta l \leq 10$  мкм (лишь в отдельных точках поля  $\Delta l \leq 15$  мкм), что соответствует спектральному разрешению заведомо не хуже 10 нм.

Предложенный принцип построения МДС с использованием дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента обеспечивает одновременную регистрацию куба данных с практически неизменной во всем спектральном рабочем диапазоне дисперсией. При этом величину последней можно изменять продольным сдвигом дифракционной решетки, что позволяет в широких пределах варьировать аналитические характеристики приборов. Проанализированные рефрактивный и рефлективный варианты оптической системы адаптированы для прототипирования. Использование приборов на базе МДС представляется перспективным для

СПР биообъектов, в том числе флуоресцентной микроспектрометрии, а также в исследованиях в области фотодинамической терапии.

1. Hagen N., Kudenov M. W. Review of snapshot spectral imaging technologies // *Opt. Engineering*. – 2013. – Vol. 52, № 9. – P. 090901-1–090901-23.
2. Bodkin A. *et al.* Snapshot hyperspectral imaging – the hyperpixel array camera // *Proc. SPIE*. – 2009. – Vol. 7334. – P. 73340H-1–73340H-11.

УДК 621.373.826

## Yb:CALYO BASED BROAD-BAND SEEDED CHIRPED PULSE REGENERATIVE AMPLIFIER

Rudnikov A.<sup>1</sup>, Kisel V.<sup>1</sup>, Yasukevich A.<sup>1</sup>,  
Hovhannesian<sup>2</sup> K., Petrosyan A.<sup>2</sup>, Kuleshov N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Center of Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus  
<sup>2</sup> Institute of Physical Research, National Academy of Sciences, Ashtarak-2, Armenia

Diode-pumped femtosecond laser sources with pulse repetition rates of hundreds kHz and pulse energies of tens microjoules are of practical importance for high-precision micromachining in industry and biomedicine [1].

These pulse trains can be generated conveniently with RA systems based on bulk regenerative amplifiers. One of the highest output power reported so far for bulk RAs is 28 W in an Yb:CALGO operating at 500 kHz, with 217 fs pulses [2]. The output power of about 21 W at 200 kHz PRF with 200 fs pulse duration is obtained on Yb:KGW dual crystal system [3]. Generalizing the above data, we can conclude that the search for new laser media with appropriate spectroscopic properties for regenerative amplification of ultrashort laser pulse is still of high interest.

Yb:CALYO crystal demonstrate promising spectroscopic properties that confirmed by excellent experimental results in mode-locked lasers provided near-transform limited pulses with wide spectra [4]. Despite the availability of femtosecond lasers providing wide spectral width pulses based on Yb-doped crystals seed lasers of large number of RA systems described in the literature have narrower pulse spectral width not over than 15nm. And this also limits the amplified pulse spectral width.

In our paper we present the experimental results of broad-band seeded Yb:CALYO-based chirped pulse regenerative amplifier for the first time to the best of our knowledge.

A conceptual scheme of the system (Fig. 1) consists of Yb:KYW seed laser (100 fs, 10 nJ), fibre-based stretcher, regenerative amplifier and compressor. A 10m-long single mode  $\varnothing 9/125 \mu\text{m}$  telecom fibre was used for pulse spectral broadening and temporal stretching ( $t_{\text{pulse}}=7.5 \text{ ps}$ ). The RA setup chosen for this experiment is quite common, employing a 40-mm-long double-BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Pockels cell for pulse injection and ejection. Pulse repetition frequency (PRF) was chosen to be 200kHz to prevent damage of the optical elements. “Off-axes” pump layout was used for longitudinal pumping of the active element [5–7]. Main advantage of such a pump scheme is that all the cavity mirrors have highly reflecting coating at 900–1100 nm. 2 mm-long a-cut

Yb(3.5 at.%):CaYAIO<sub>4</sub> crystal was used as a gain medium. The last unit of the amplifier system is compressor based on transmission diffraction grating with 1000 grooves per millimetre.

As a pump source a multiple single emitter InGaAs fiber coupled laser diode ( $\varnothing 105 \mu\text{m}$ , NA=0.15) with maximum output power of about 25 W was used. The pump light was formed by set of lenses into the spot with diameter of about  $180 \mu\text{m}$  ( $1/e^2$ ). The losses on transmission of the hole from such “pump” mirror did not exceed 3 % of pump power. Besides that such pumping scheme enable us to tune the wavelength of the laser diode exactly in the absorption band of the material without losses in the short-wave pass filter (input mirror). One of the important things most notably for regenerative amplifiers with longitudinal pumping schemes is that the part of the intracavity pulse energy passes through the input mirror and damages pumping diode. Our pumping scheme is free of these negative issues.

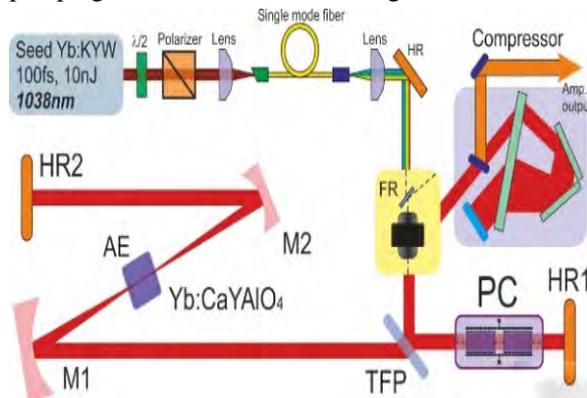


Fig. 1. Schematic of the Yb:CaYAIO<sub>4</sub> chirped pulse regenerative amplifier

In Fig. 2 the pump beam profiles during the propagation through the gain crystal are depicted. As can be seen the pump beam profile was a circular and homogeneous inside the crystal. The drop in the middle of the pump beam profile appears at the distances  $>3\text{mm}$  from pump beam waist and therefore do not introduce any negative influence due to the pumping inhomogeneity on the mode-matching and output laser performance.

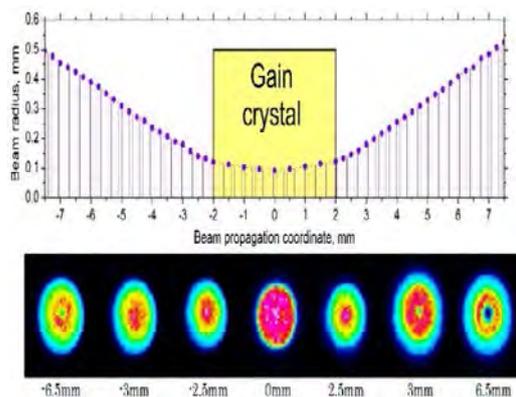


Fig. 2. Beam radius and pump beam profiles during the propagation through the cavity and gain crystal

During the RA experiment we measured the output pulse train parameters for  $\pi$ - and  $\sigma$ -polarized light in the gain medium at 200 kHz PRF. The dependencies of average output power and pulse spectral width on cavity round trip number (c.r.t.) for Yb:CALYO regenerative amplifier system (before compression) are presented in Fig. 3.

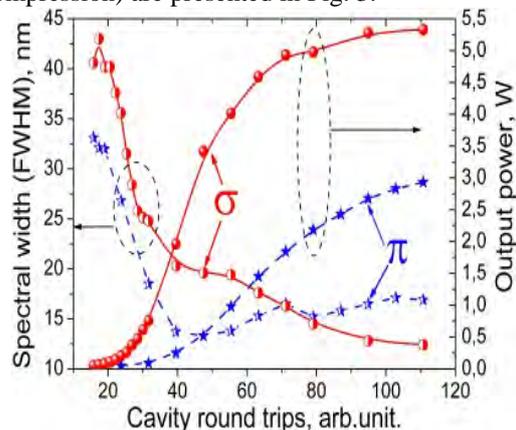


Fig. 3. Dependencies of average output power and pulse spectral width on cavity round trip number

The maximum average output power of 4.2 W was obtained for  $\pi$ -polarized light. On increasing the cavity round trips number from 63 to 126 pulse spectral width decreases slightly from 19.2 nm to 18.2 nm. The widest amplified pulse spectrum of 42.5 nm (FWHM) was obtained for  $\sigma$ -polarized light after 16 c.r.t. On increasing c.r.t. number from 16 to 126 output power has risen from 11 mW to 4 W. Amplified pulse spectrum evolution under its round trip through the amplifier for  $\sigma$ -polarization is shown in Fig. 4.

As one can see from the Fig. 3  $\pi$ -polarization demonstrates weak dependence of the amplified pulse spectral width on the c.r.t. number. Autocorrelation trace of the amplified pulses for  $\pi$ -polarized light at the highest output power is shown in Fig. 5. Measured pulse duration was about 120 fs assuming Lorentzian pulse shape.

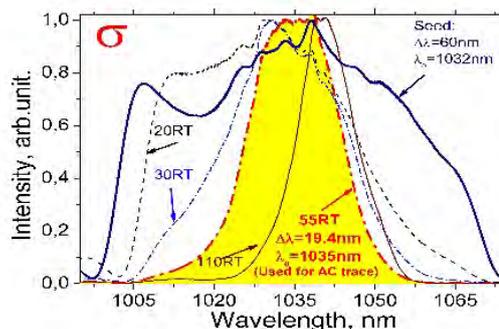


Fig. 4. Pulse spectrum evolution under its round trip (RT) through the amplifier for  $\sigma$ -polarization

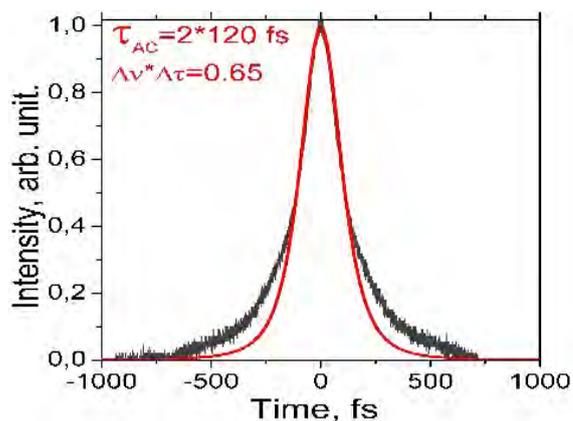


Fig. 5. Autocorrelation trace of the amplified pulses for  $\pi$ -polarization at the highest output power

In conclusion, the results of experimental investigation of broad-band seeded Yb:CALYO-based chirped pulse RA are reported for the first time to our knowledge. It generates as high as 3 W of average output power with 120 fs (19.4nm FWHM) compressed pulses at 200 kHz repetition rate.

1. D. Breitling, C. Föhl, F. Dausinger, T. Kononenko and V. Konov, in *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications*, F. Dausinger, F. Lichtner and H. Lubatschowski, eds. (Springer, Berlin, 2004).
2. E. Caracciolo et al., "28-W, 217 fs solid-state Yb:CaIGdO<sub>4</sub> regenerative amplifiers," *Opt. Lett.* 38, 4131-4133 (2013).
3. G.H. Kim et al., "A high brightness Q-switched oscillator and regenerative amplifier based on a dual-crystal Yb:KGW laser," *Laser Phys. Lett.* 10 (2013) 125004 (5pp).
4. Julien Pouysegur et al., "Sub-100-fs Yb:CALGO nonlinear regenerative amplifier," *Opt. Lett.* 38, 5180-5183 (2013).
5. P. Sévillano et al., "32-fs Kerr-lens mode-locked Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> oscillator optically pumped by a bright fiber laser," *Opt. Lett.* 39, 6001-6004 (2014).
6. V. E. Kisel et al., "High-power, efficient, semiconductor saturable absorber mode-locked Yb:KGW bulk laser," *Opt. Lett.* 40, 2707-2710 (2015).
7. A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, and N. Kuleshov, "Yb<sup>3+</sup>:CaYAlO<sub>4</sub>-based chirped pulse regenerative amplifier," *Opt. Lett.* 41, 2249-2252 (2016).
8. A. Rudenkov, V. Kisel, V. Matrosov, and N. Kuleshov, "200 kHz 5.5 W Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub>-based chirped-pulse regenerative amplifier," *Opt. Lett.* 40, 3352-3355 (2015).

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНОЙ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ Скопцов Н. А.<sup>1</sup>, Лойко П.А.<sup>1,2</sup>, Глазунов И. В.<sup>1</sup>, Маляревич А. М.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Юмашев К. В.<sup>1</sup>, Adrian Goldstein<sup>3</sup>, Zeev Burshtein<sup>4</sup>, Ehud Galum<sup>3</sup><sup>1</sup> НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь,<sup>2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация<sup>3</sup> Israel Ceramic and Silicate Institute, Haifa, Israel<sup>4</sup> Materials engineering department, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel

Модуляция добротности резонатора лазера – это распространенный метод получения сверхкоротких импульсов [1, 2]. При пассивной модуляции добротности используют компактный внутрирезонаторный элемент - пассивный затвор. Преимущество пассивной модуляции перед активной в отсутствии силовой и управляющей электроники, которая увеличивает размеры, вес и стоимость лазера.

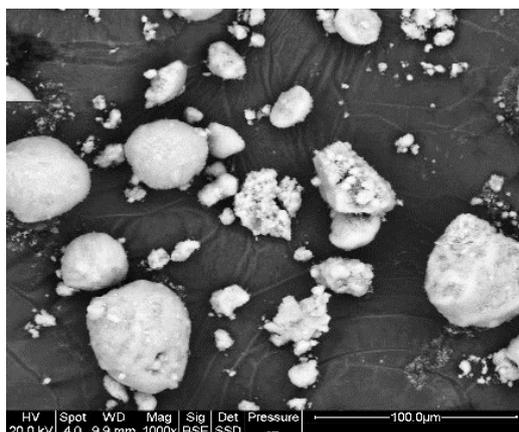
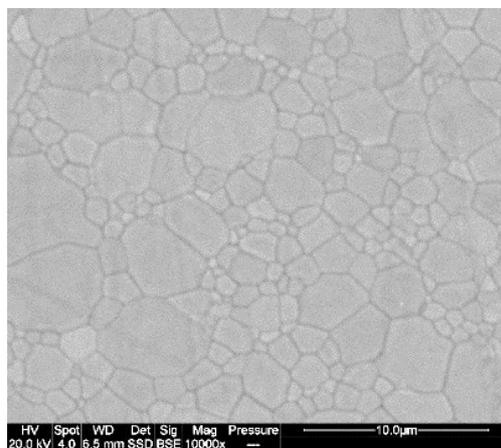
Сегодня широкое распространение получили пассивные затворы на основе монокристалла шпинели кобальта  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  для получения модуляции добротности эрбиевых лазеров в спектральном диапазоне 1,3–1,7 мкм. В настоящей работе мы представляем результаты исследования прозрачной поликристаллической керамики  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Ключевое отличие разработанной керамики – значительное снижение стоимости производства, по сравнению с выращиванием монокристаллов.

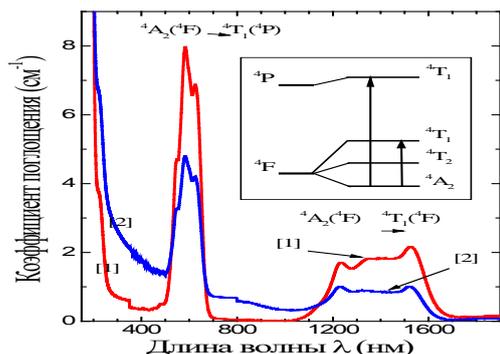
В качестве исходного сырья для получения керамики использовался порошок шпинели, содержащий кобальт. Порошок был синтезирован методом осаждения гидроксидов [3, 4]. Средний размер зерен полученного порошка составляет 0,15 мкм. Керамика была приготовлена из порошка методом спекания. Спекание производилось в несколько этапов с постепенным повышением давления и температуры. На конечной стадии спекание проходило под давлением аргона  $\text{Ar}$  200 МПа при температуре 1580°C в течение 4 часов. Содержание кобальта в полученных образцах  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  составляет 0,04 ат. % и 0,07 ат. %, что соответствует 0,020 вес. % и 0,035 вес. %. Концентрация ионов кобальта в образцах  $5,7 \cdot 10^{18}$  и  $1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, соответственно. Из образцов были изготовлены круглые полированные пластинки толщиной 1,34 и 1,77 мм, соответственно. Плотность образцов 3,57 г/см<sup>3</sup>.

Для определения структуры кристаллической фазы, выполнен рентгенофазовый анализ (РФА). Измерение производилась с помощью дифрактометра APD-2000 ItalStructures. Размер гранул исходного кристаллического порошка (рисунок 1) и морфология поверхности керамики (рисунок 2) и были определены на сканирующем электронном микроскопе (SEM) Quanta 200.

Регистрация спектров поглощения осуществлялась с помощью спектрофотометра Cary Varian 5000. На рисунке 3 представлены спектры поглощения керамики шпинели,

содержащей ионы кобальта. Оба спектра идентичны и являются характерными спектрами ионов кобальта в тетраэдрической позиции. Широкая полоса поглощения в области 1,2–1,7 мкм соответствует переходу между основным  $^4\text{A}_2(^4\text{F}_{9/2})$  и возбужденным  $^4\text{T}_1(^4\text{F})$  состоянием иона кобальта. Данная полоса представляет интерес для получения модуляции добротности лазеров. Полоса в области 0,5–0,7 мкм соответствует переходу из основного состояния  $^4\text{A}_2(^4\text{F}_{9/2})$  в возбужденное состояние  $^4\text{T}_1(^4\text{P})$ .

Рисунок 1 – SEM изображение гранул кристаллического порошка  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ Рисунок 2 – SEM изображение полированной поверхности керамики  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$


 Рисунок 3 – Спектр поглощения керамики  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 

Исследована зависимость пропускания ситаллов от интенсивности падающего лазерного излучения (рисунок 4). Образцы облучались лазерными импульсами с энергией 1,3 мДж, длительностью 85 нс на длине волны 1540 нм. Диаметр сфокусированного пятна на образце составлял 70 мкм. Для обработки экспериментальных данных, которые показывают, что ситалл с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ , хорошо просветляется, использовалась модель медленно релаксирующего насыщающегося поглотителя [5]:

$$\frac{dE_0}{dz} = -I_{sa} \cdot \frac{\ln(1/T_0)}{L} \cdot \left[ (1-\gamma) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_0}{I_{sa}}}\right) + \gamma \cdot \frac{E_0}{I_{sa}} \right],$$

где  $I_{sa} = h\nu / \sigma_a$  – интенсивность насыщения поглощения;  $\gamma = \sigma_{esa} / \sigma_a$  – контраст просветления;  $\sigma_a$  и  $\sigma_{esa}$  – поперечные сечения поглощения из основного и возбужденного состояний, соответственно. По результатам моделирования определены контраст просветления  $\gamma = 0,12$ , поперечные сечения поглощения из основного  $\sigma_a = 2,9 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$  и возбужденного  $\sigma_{esa} = 0,35 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$  состояний.

УДК 536.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ

Маханько Д.С., Луговик А.Ю., Шкадаревич А.П.

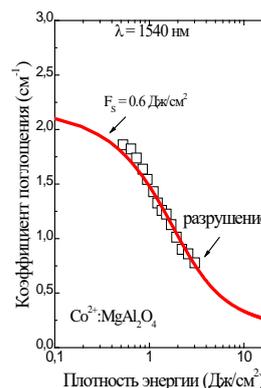
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Оптико-электронный прибор – сложная система, составными частями которой являются оптические и механические устройства, лазеры, приемники излучения, электронные блоки, устройства волоконной и интегральной оптики и т. д. Классификация оптико-электронных приборов представлена на рисунке 1. Требования к ОЭП определяются, исходя из необходимости решения задач военного характера, а также ряда проблем народнохозяйственного значения (космическая съемка, исследование природных

ресурсов), которые не решаются визуальными оптическими и радиоэлектронными приборами.

Тепловой режим оптико-электронного прибора (ОЭП) оказывает влияние как на качество и надежность работы отдельных его узлов, так и на работу прибора в целом. Нарушение теплового режима приводит к искажению полезного сигнала, к появлению шумов в приборе, что в свою очередь влияет на качество работы прибора.

В процессе работы прибор подвергается различным тепловым воздействиям. В результате в оптической системе возникает в общем случае


 Рисунок 4 – Зависимость коэффициента поглощения от плотности энергии для керамики  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 

Таким образом, в работе синтезированы новые лазерные материалы – прозрачной поликристаллической керамики  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Исследованы структурные, спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства.

Показано, что прозрачная поликристаллическая керамика  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  являются перспективной средой для пассивной модуляции добротности лазеров спектрального диапазона 1,3–1,7 мкм.

1. F. J. McClung and R. W. Hellwarth, "Giant Optical Pulsations from Ruby" // *J. Appl. Phys.*, 33 [3] 828-9 (1962).
2. J. Hecht, *Understanding Lasers*. J. Wiley Interscience, N.Y., 2001.
3. R. J. Bratton, "Cocipitates Yielding  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  Spinel Powders" // *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 48 [8] 759-62 (1969).
4. J. Rufner, D. Anderson, K. van Benthem and R. H. R. Castro, "Synthesis and Sintering Behavior of Ultrafine (<10 nm) Magnesium Aluminate Spinel Nanoparticles" // *J. Am. Ceram. Soc.*, 96 [7] 2077-85 (2013).
5. Denisov I.A., Demchuk M.L., Kuleshov N.V., Yumashev K.V.  $\text{Co}^{2+}:\text{LiGa}_5\text{O}_8$  saturable absorber passive Q-switch for 1.34  $\mu\text{m}$   $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$  and 1.54  $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}:\text{glass}$  lasers // *Appl. Phys. Lett.*, 77, 2455-2457 (2000).

сложное температурное поле, изменяющееся в пространстве и во времени и отклоняющееся от номинального значения температуры. Кроме того, наряду с температурой может изменяться и давление воздуха (например, при аэросъемке). Все это приводит к ряду изменений в оптической системе.

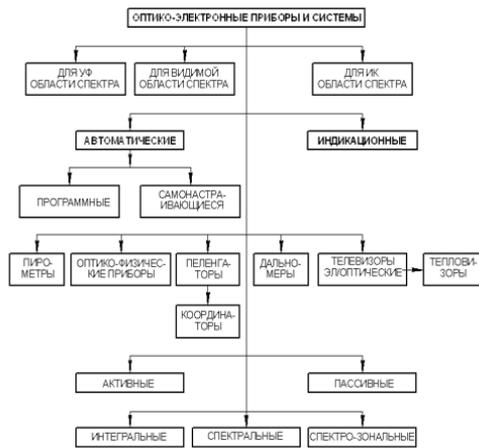


Рисунок 1 – Классификация оптико-электронных приборов и систем

Из-за теплового расширения материалов при наличии равномерных в пространстве температурных полей изменяются размеры системы: радиусы кривизны и толщины линз и зеркал, расстояния между элементами и т. д., а при неравномерных температурных полях меняются и формы элементов. Например, плоскопараллельная пластинка может превратиться в линзу, если температура ее внутренней зоны отличается от температуры периферии.

Из-за температурной зависимости показателя преломления в прозрачных элементах возникают равномерные или неравномерные отклонения показателей преломления от номинальных значений. Кроме того, при неравномерном температурном поле в элементе появляются термонапряжения, которые из-за фотоупругого эффекта также вносят вклад в изменение показателя преломления. Вследствие зависимости температурного коэффициента показателя преломления от длины волны изменяются величины, характеризующие хроматические свойства материалов (например, коэффициент дисперсии Аббе).

Изменение температуры и давления воздуха в оптической системе приводит к изменению его показателя преломления и соответственно к пропорциональному изменению показателей преломления всех материалов.

Перечисленные выше возмущения в оптической системе вызывают появление дополнительных термических аберраций: тепловой расфокусировки, термической сферической аберрации, термической комы и т. д. – и в конечном итоге ухудшение качества изображения.

Тесная связь между тепловым режимом ОЭП и его функциональными характеристиками приводит к тому, что специальный выбор принципиальной схемы, вида и параметров конструкции ОЭП является одним из важнейших путей обеспечения его термостабильности. Таким образом, «тепловое» проектирование ОЭП неправомерно отделять от его «функционального» проектирования. В связи с этим иногда оказывается совершенно неэффективным подход, при котором для уже разработанного прибора определяют требования к его тепловому режиму, а затем пытаются добиться их выполнения с помощью той или иной системы обеспечения нормального теплового режима.

Несомненно, для большинства ОЭП характерны высокие требования к точности и надежности работы. Поэтому обеспечение нормального режима является одной из главных задач при проектировании ОЭП.

Обеспечение нормального теплового режима основывается на расчете температурных полей ОЭП с различной степенью детализации и последующем анализе влияния теплового режима на качество работы прибора.

Таким образом актуальной является разработка методики, позволяющей провести расчет температурных полей оптико-электронного прибора с учетом всех основных воздействующих на него факторов, с требуемой точностью и степенью детализации и проанализировать влияние теплового режима на работу прибора в соответствии с его назначением [1].

Как правило, результатом теплового расчета является интервал изменения температуры и градиентов температуры в элементах прибора. Ширина указанных интервалов определяется погрешностью методики расчета температурных полей и неопределенностью входной информации.

Анализ работы ОЭП различного назначения (обнаружения, измерения, слежения и получения изображения) начинается с расчетов средних температур и температурных полей элементов оптической системы, далее проводится анализ термодформаций и термонапряжений (приближенно, аналитически или численно), определяются расстояния между оптическими элементами и коэффициенты преломления. Полученные данные используются для расчета функции рассеяния и ОПФ. Такие расчеты, как правило, выполняются численно на ЭВМ, и лишь в простейших случаях могут быть использованы аналитические формулы. Результаты расчета температуры приемника позволяют определить его чувствительность и постоянную времени и рассчитать передаточную функцию. Используя средние температуры элементов ОЭП, вычисляются шумы (тепловые, фотонные, температурные) в приемнике излучения, усилителе и преобразователе. Для приборов, работающих в

длинноволновой области спектра, рассчитывается собственное излучение оптических элементов. Используя полученную информацию, вычисляются передаточная функция всего прибора, спектры полезного сигнала, собственного излучения и шумов на выходе. И, в зависимости от назначения прибора, определяются параметры, характеризующие его работу (функция качества или оценочная функция), т.е. вероятность обнаружения, погрешность измерения, слежения, качество изображения.

В настоящее время в сфере систем автоматического проектирования произошли ощутимые изменения, внедрение систем анализа является логическим развитием процесса автоматизации проектирования.

Компьютерное моделирование является необходимым инструментом создания современных технических объектов. Всё более широкий круг предметов и явлений становится объектом компьютерной симуляции. Она внедрилась практически во все сферы инженерной деятельности.

Потребности современного производства требуют от инженера-практика нового уровня теоретической и практической подготовки – выполнения компьютерного анализа и проектирования. Наиболее логичный путь для квалифицированного инженера – освоение доступных интегрированных приложений, сопровождаемое овладением соответствующей теоретической базой.

Такие программные продукты как Flow Simulation, EFD.Lab, EFD.V5 и EFD.Pro сделали прикладные расчеты в области теплопередачи достоянием широкого круга инженеров [2].

Оптимальный, а во многих случаях и единственный, путь создания конкурентоспособной продукции – это сочетание расчетных исследований, которые достаточно адекватно моделируют физические явления, определяющие интересующие покупателя характеристики изделия, с экспериментальными исследованиями, необходимыми для проверки этой адекватности.

Естественно, расчеты должны выполняться с помощью оптимальной для разработки данной продукции программы, т.е. базирующейся на достаточно адекватных учитывающих физические явления математических моделях и достаточно быстродействующей для выполнения расчетов за время, приемлемое для разработки данной продукции.

1. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
2. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040с.

УДК 623.4.052.52

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ НАВОДКИ ОПТИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА

Ийд Кусай Мохамад<sup>1</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>1</sup>, Шкадаревич А.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»  
Минск, Республика Беларусь

Оптический прицел обеспечивает более высокую точность наводки стрелкового оружия на цель по сравнению с классической оружейной мушкой. Точность наводки оружия на цель определяется точностью расчёта баллистической траектории движения пули и степенью воздействия внешних факторов среды. Для решения этой задачи осуществляют предварительный математический расчёт значений по пристрелке оружия с учётом различных дистанций и углов стрельбы, а также скорости ветра. Полученные численные значения в виде поправок в последующем выставляются на механизме горизонтальной и вертикальной выверки оптического прицела. Цель работы заключалась в разработке портативной конструкции модуля баллистического калькулятора на основе расчётных данных полученных в ходе численных методов

исследования в программном пакете Ballistic Explorer (Dexadine, Inc.).

В исходные данные были заложены параметры, учитывающие скорость и направления ветра, а также наклонение оси визирования относительно линии горизонта.

Принцип работы баллистического калькулятора рассмотрим на примере расчёта траектории движения пули от патрона 7Н6 калибром 5,45 мм для штурмовой винтовки АК-74Н с боковой планкой для установки ночного оптического прицела. Исходными данными для расчёта выступали следующие параметры: масса патрона – 3,43 г; начальная скорость пули 880 м/с. Переменными данными являлась дистанция пристрелки АК-74Н, которая выбиралась 100, 200 и 300 м.

Пристрелка оптического прицела на дистанции 100 метров даёт идеальную фокусировку прицельной сетки и мишени. На прицелах, с отстройкой

параллакса, на барабанчиках механизма выверки стоят деления поправки в угловых минутах соответствующие величине смещения (в см) на дальность дистанции 50, 100, 200, 300...1000 м.

Исходя из баллистических особенностей траектории движения. Пуля на дистанции 100–200 метров имеет стабильные показания баллистики, и на дистанции 300 метров сохраняет эффективную энергию выстрела 657 Дж. С увеличением дистанции до 1000 м энергия уменьшается почти в 6 раз и составляет около 118 Дж [2].

На рис.1 представлены результаты расчёта баллистики пули летящей до цели, установленной на дистанции 300 м без введения поправок. Исходя из величины превышения 53,2 см баллистический угол (бросания) практически не меняется и находится в пределах 0,2 градусов. Из анализа полученных значений видно, что для сверхдальних дистанций до 1000 м баллистический угол возрастает соответственно до 3 градусов (рис. 2).

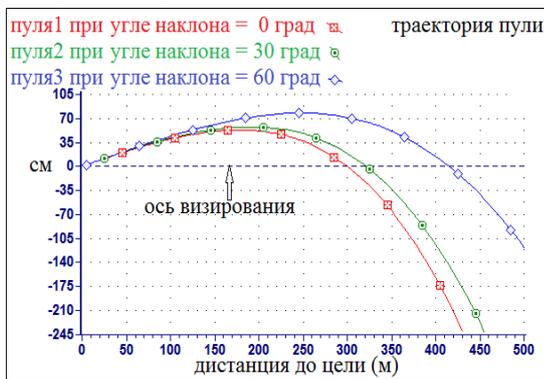


Рисунок 1 – Баллистика на дистанции 300 м при наклонении оси визирования «без поправки»

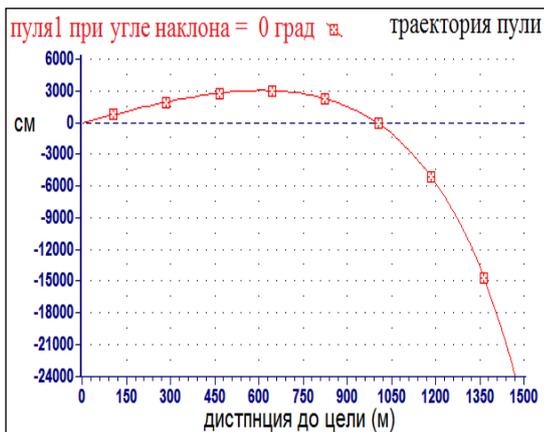


Рисунок 2 – Баллистика на дистанции 1000 м

При нахождении цели выше уровня горизонта, например цель в верхних этажах здания, летящий вертолёт, снайпер на горном хребте и т.д. или ниже уровня горизонта, например цель в каньоне, необходимо учитывать угол наклона между линией визирования и уровнем горизонта. Максимально допустимый диапазон значений представлен в таблице 1 и определяется предельной величиной поправок выставляемых на барабане вертикальной выверки (вращение по часовой стрелке). При

больших углах наклона на траекторию движения пули значительное влияние оказывает сила тяжести, смещающая баллистическую кривую вниз относительно цели. Поэтому необходимо удерживать ствол оружия ниже прицельной марки.

Таблица 1. Значение поправки соответствующее наклонениями при нацеливании на цель на дистанции (100, 200, 300 м)

Наклонения оси визирования от линии горизонта, градус	Величина смещения пули, см, при наводке на цель (дистанция 300 м)	Значение поправки соответствующее перемещению, угл. минут
0	0	0
± 10	2,175	0,25
± 15	5,22	0,6
± 20	8,7	1
± 25	13,05	1,5
± 30	19,575	2,25
± 35	26,1	3
± 40	33,93	3,9
± 45	42,63	4,9
± 50	52,2	6
± 55	60,9	7
± 60	72,21	8,3

В ходе расчётов установлено, что скорость ветра в перпендикулярном направлении [западное (09:00) – восточное (03:00)] и наоборот, оказывает существенное влияние на траекторию полёта пули (см. таблицу 2).

Отклонение, связанное с другим компонентом вектора скорости ветра по направлению [северное (12:00) – южное (06:00)], попутно траектории движения пули, можно игнорировать. Поскольку при скорости ветра 10 и 20 м/с это отклонение составляет 0,5 и 1,0 угловая минута. Выставить такие значения на прицеле не представляется возможным, так как один щелчок механизма выверки обычного равен 1 угловой минуте, а максимальное значение 1,4 угловых минут соответствует скорости ветра 28 м/с, при котором объекты внешней среды уже становятся не устойчивыми.

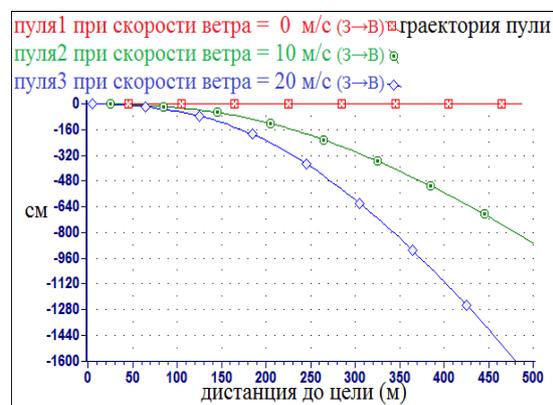


Рисунок 3 – Траектория пули до цели на дистанции (300 м) при дрейфе ветра «без поправки»

Компенсация этих отклонений всегда выполняются с помощью горизонтального механизма выверки, так как чтобы переместить вершину прицельного угольника сетки прицела направо, когда направление ветра (З→В), и налево, когда направление ветра (В→З) (рисунок 3).

Обычно диапазон выверки прицела  $\pm 1$ град ( $\pm 60$  угловых минут), поэтому нет возможности исправлять отклонения баллистической пути пули при дрейфе ветра при значении отклонения больше (60 угловых минут) (таблица 2).

Таблица 2. Значение поправки соответствующее отклонениями при нацеливании на цель на дистанции (100, 200, 300 м)

Скорость ветра, м/с, для одного компонента: вектор в направлении (З→В)	Величина смещения пули, см, при наводке на цель (дистанция 100 м)	Значение поправки соответствующее перемещению, угл. минут	Величина смещения пули, см, при наводке на цель (дистанция 200 м)	Значение поправки, соответствующее перемещению, угл. минут	Величина смещения пули, см, при наводке на цель (дистанция 300 м)	Значение поправки, соответствующее перемещению, угл. минут
1	2,175	0,75	11,6	2	30,45	3,5
2	5,075	1,75	23,2	4	60,9	7
4	9,425	3,25	46,4	8	119,625	13,75
6	14,5	5	69,6	12	178,35	20,5
8	18,85	6,5	92,8	16	239,25	27,5
10	23,2	8	116	20	295,8	34
12	29	10	139,2	24	356,7	41
14	34,075	11,75	156,6	27	417,6	48
16	39,15	13,5	185,6	32	478,5	55
18	43,5	15	208,8	36	539,4	62
19	44,95	15,5	220,4	38	-	-
20	47,85	16,5	234,9	40,5	-	-
22	52,2	18	250,85	43,25	-	-
24	56,55	19,5	278,4	48	-	-
26	63,8	22	295,8	51	-	-
28	66,7	23	319	55	-	-

УДК 678.746

## МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Анисович А.Г.<sup>1</sup>, Бакаев А.Г.<sup>1</sup>, Маркевич М.И.<sup>1</sup>,  
Мальшко А.М.<sup>1</sup>, Чапланов А.М.<sup>1</sup>, Журавлева В.И.<sup>2</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Общей тенденцией развития современного производства является использование новых современных технологий обработки материалов. Ведущее направление в этой области принадлежит лазерному воздействию. Процесс взаимодействия характеризуется рядом особенностей: лазерное воздействие является бесконтактным, можно удалять малые количества материала, зона влияния сосредоточена в микронном слое, поэтому характеристики материала остаются практически неизменными.

Лазерные технологии быстро развиваются и являются более гибкими. Такие лазерные технологии обработки материалов, как маркировка, резка, сверление основаны на процессе лазерной абляции. Вопросам взаимодействия лазерного излучения с твердыми телами посвящено большое количество работ [1, 2], имеются данные по изменению морфологии поверхности и фазового состава. При разработке технологических лазерных режимов важно

учитывать процесс взаимодействия излучения с материалами с неоднородной структурой.

Цель работы установить влияние лазерного воздействия на морфологию экструдированного пенополистирола «Батэплекс 35-Г4».

Для обработки материала использован лазер с модуляцией добротности LS-2134D на алюмоиттриевом гранате с длиной волны 1064нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, энергия одиночного импульса составляет 0,05 Дж).

Образованная в результате испарения вещества под действием первого импульса горячая абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной областью давления воздуха, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции [1]. Материал облучали лазерным излучением в интервале плотностью мощности  $1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> при

различных общих длительностях воздействия от 5 до 15 секунд.

Исследования состава образцов проводились с помощью системы энергодисперсионного (EDS) микроанализа, установленной на сканирующем электронном микроскопе SEM 515.

Изображения микроструктуры образцов получены на металлографическом комплексе, на базе оптического микроскопа Микро-200 при увеличении 200<sup>x</sup>. В состав комплекса входят: персональный компьютер; металлографический микроскоп МИКРО 200; мониторы, которые предназначены для отображения, редактирования и анализа обработанных изображений; видекамера с адаптером [3]. Количественный анализ изображений производился в программе IMAGE-SP. Фотографии макроструктуры получены сканированием. Толщина образца составляла 700 мкм.

Процесс абляции материала зависит от характеристик лазера (частота излучения, интенсивность, скважность, длительность и форма импульса, размер светового пятна) и теплофизических свойств, состава и структуры материала.

В процессе абляции можно выделить: поглощение излучения и нагрев вещества до температуры испарения; образование плазмы; быстропротекающие физико-химические превращения; разлет плазмы. Процесс поглощения лазерного излучения материалами зависит от качества (состояния) поверхности, структурных неоднородностей, пористости.

В процессе разрушения пенополистирола давление паров вызывает образование потока, который направлен к выходу от углубления. Этот поток выносит часть материала со стенок углубления, в результате чего удаленная масса оказывается больше. Воздействие лазерного излучения приводит к существенному изменению поверхностных свойств пенополистирола с учетом химических реакций в зоне воздействия.

На рисунке 1 представлена морфология исходного материала.

Структура материала ячеистая, размер ячейки составляет преимущественно от 100 до 350 мкм (рис. 2).

Макроструктура материала после отжига показана на рис. 3, а, растровая микрофотография – на рис. 3, б. Отверстие имеет овальную форму. Средний диаметр полученного отверстия 1500 мкм (рис. 3, а, б). В зоне воздействия происходит изменение структуры (рис. 3), ячейки деформируются и как следствие этого прочностные характеристики изменяются. Из рисунка 3 следует, что в результате процесса абляции при разрушении материала (сквозное отверстие) вынос материала происходит неравномерно.

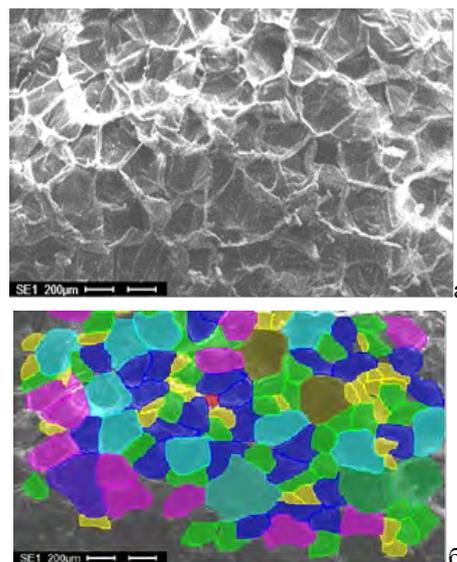


Рисунок 1 – Морфология поверхности исходного материала: а – растровая микрофотография, б – маска определения размеров

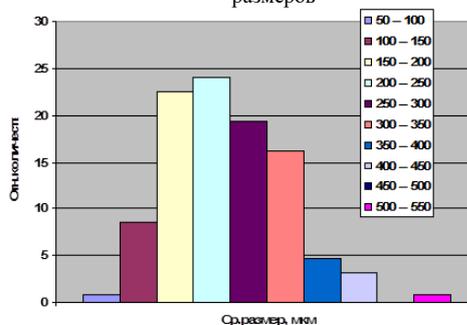


Рисунок 2 – Распределение ячеек материала по размерам

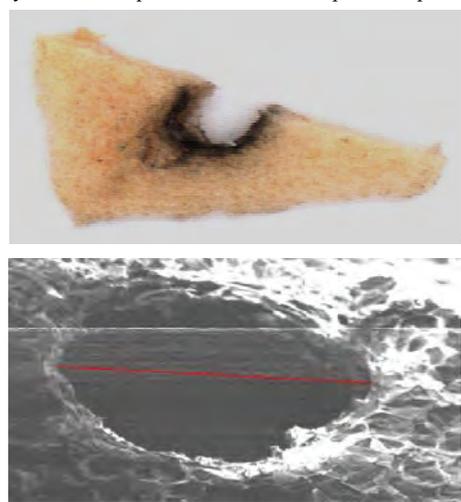


Рисунок 3 – Макро - (а) и микроструктура (б) материала в зоне оплавления

Изучено влияние лазерного воздействия на морфологию экструдированного пенополистирола «Батэплекс 35-Г4». Установлено, что в зоне воздействия происходит изменение структуры, ячейки деформируются, что приводит к изменению прочностных характеристик.

1. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно – оптические эффекты и нелинейно – оптическая диагностика / С.А. Ахманов [и др.] // Успехи физических наук. – 1985. – Т. 147. – Вып. 4. – С. 675–745.
2. Маркевич, М.И. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М.И. Маркевич, А.М. Чапманов // Известия Национальной академии наук Беларуси. – 2016. – № 1. – С. 28–34.
3. Анисович, А.Г., Румянцова, И.Н. Практика металлографического исследования материалов. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 221 с.

УДК 681

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА

*Артюхина Н.К., Самусенко А.А.*

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.*

В настоящее время интерферометры являются незаменимыми инструментами при оценке качества формы в оптическом производстве. Они используются в измерительных системах для контроля плоскостности и сферичности оптических поверхностей, измерения радиуса кривизны и оптических параметров линз [1].

При проектировании интерферометра следует учесть ряд немаловажных факторов, которые оказывают влияние на эксплуатационные, технические и иные характеристики прибора. Все они изначально включаются в техническое задание.

Техническое задание является исходным материалом для создания интерферометра. Поэтому техническое задание (сокращенно ТЗ) в первую очередь должно содержать основные технические требования к продукту и отвечать на вопрос, что данная система должна делать, как работать и при каких условиях. Как правило, этапу составления технического задания предшествует проведение обследования предметной области, которое завершается созданием аналитического отчета. Именно аналитический отчет (или аналитическая записка) ложится в основу технического задания. [2].

Если в отчете требования заказчика могут быть изложены в общем виде и проиллюстрированы UML-диаграммами, в техническом задании следует подробно описать все функциональные и пользовательские требования к системе. Чем подробнее будет составлено техническое задание, тем меньше спорных ситуаций возникнет между заказчиком и разработчиком во время приемочных испытаний.

Таким образом, техническое задание является документом, который позволяет как разработчику, так и заказчику представить конечный продукт и впоследствии выполнить проверку на соответствие предъявленным требованиям. [3].

Техническое задание, как правило, включает следующие разделы:

- общие сведения о системе (программе);
- назначение, цели и задачи системы (программы);

- требования к системе (функциональные требования, пользовательские требования, требования к системе в целом и тд);

- требования к видам обеспечения;
- требования к документированию;
- стадии и этапы разработки;
- порядок контроля и приемки системы (программы).

При проектировании интерферометра, основным назначением которого является контроль качества поверхностей крупногабаритных зеркал; дополнительным – контроль качества оптических деталей со сферическими поверхностями, указываются его основные технические параметры. К ним относятся:

- максимальные габаритные размеры;
- максимальный вес;
- рабочая длина волны;
- диаметр рабочего светового пучка;
- тип приемника изображения;
- пзс-камера;
- тип источника света;
- режим измерения;
- длина кабелей;
- напряжение питания.

Также в техническом задании задаётся принцип работы интерферометра и приводится принципиальная оптическая схема. Так, в ней световой пучок от лазера 1 с помощью микрообъектива 2 фокусируется на диафрагме 3, расположенной в фокальной плоскости коллиматорного объектива 4. Параллельный пучок света, вышедший из объектива 4, проходит через первую поверхность светоделителя 5, расположенного под углом 45 град к оси пучка, и разделяется на два пучка, один из которых отражается от второй поверхности светоделителя, отражается от зеркала 6 и проходит обратно к зеркалу 7, а второй пучок проходит через светоделитель 5 и объектив 9 к контролируемому зеркалу, возвращается обратно и, отразившись от второй поверхности светоделителя, тоже попадает на зеркало 7. Эти световые пучки формируют интерференционную картину, которая объективами 11-1 и 11-2 проецируется на поверхности матовой пластинки 13. Объективы

11-1 (проекторный) и 11-2 (фокусирующий) обеспечивают оптическое сопряжение плоскостей апертурной диафрагмы контролируемой детали и матовой пластинки 13 так, чтобы изображение края детали было резким. Матовая пластинка 13 непрерывно вращается для уничтожения спекл-структуры изображения. Панкратическая система 14 проецирует изображение с матовой пластинки 13 на чувствительную площадку ПЗС-камеры 12, обеспечивая изменение масштаба изображения. Поляризатор 10 предназначен для регулировки уровня освещенности изображения на фотоприемнике.

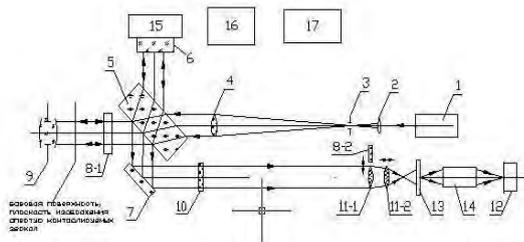


Рисунок 1 – Принципиальная оптическая схема: 1 – лазер; 2 – микрообъектив; 3 – диафрагма; 4 – коллиматорный объектив; 5 – светоделитель; 6, 7 – зеркало; 8 – ослабитель; 9, 11 – объектив; 10 – поляризатор; 12 – ПЗС-камера; 13 – матовая пластинка; 14 – панкратическая система

В дальнейшем в техническом задании на интерферометр указываются требования по конструктивному варианту исполнения интерферометра. Однако, одним из самых важных моментов является задача максимально точно определить

требуемые параметры элементов, входящих в состав прибора, и указать их основные эксплуатационные характеристики.

Так, для лазера изначально определяются следующие параметры: тип, длина волны излучения, длина когерентности, режим работы, мощность, вариант крепления в корпусе и длина сетевого кабеля питания.

Важное значение имеет максимально точный выбор и иных компонентов, входящих в оптическую схему интерферометра. Здесь следует внимательно относиться к линзам, входящим в состав объектива, светоделителям и зеркалам. На каждый из данных элементов следует задать характеристики, которые в общем итоге позволят получить требуемое качество работы интерферометра и уменьшат суммарную погрешность измерения.

В техническом задании отмечается и тот факт, что дизайн интерферометра должен иметь современный вид, а сам прибор соответствовать требованиям по безопасности, эргономике и энергосбережению.

Однако, техническое задание не носит окончательное значение и в процессе дальнейшей работы по разработке интерферометра отдельные узлы и компоненты могут быть изменены.

1. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. – Л., Машиностроение, 1976. – 296 с.;
2. ГОСТ 19.201-78. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.
3. ГОСТ 34.602.89. Техническое задание на создание автоматизированной системы.

УДК 535.317

## КОРРЕКЦИЯ КРИВИЗНЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТРЕХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ

Артюхина Н.К., Ключко Т.Р., Чернавчиц Д.А.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Национальный технический университет «Киевский политехнический институт имени И. Сикорского»  
Киев, Украина

Современные зеркальные системы находят широкое применение в различных оптических приборах, работающих как в инфракрасной, так и в ультрафиолетовой областях спектра. В них отсутствуют хроматические aberrации для любых значений оптических характеристик. Двухзеркальные системы наиболее широко исследованы и классифицированы [1]. Системы из трех зеркал обладают более широкими aberrационными возможностями по сравнению с ними. Представляет практический интерес разработка конструкций светосильных зеркальных объективов с увеличенным углом поля зрения, имеющих плоское изображение [2].

В работе проводится исследование возможности получения план-коррекции в трехзеркальном анастигмате. Предполагается также апланатическая коррекция [3]. В процессе анализа использованы оптические схемы базовых систем, представленных

на рисунке 1 (одно из зеркал имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей). В объективах лучи претерпевают по одному отражению от каждого из зеркал.

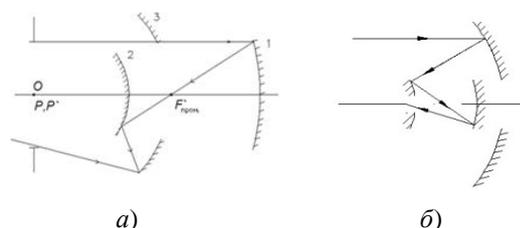


Рисунок 1 – Схемные решения трехзеркальных объективов с промежуточным изображением

Рассмотренные объективы состоят из двух вогнутых зеркал и одного выпуклого и имеют промежуточное изображение. Схема (рис.1, а) состоит из сферических зеркал с концентрическим расположением, где кривизна

изображения принципиально не устранима [4]. В схеме (рис. 1, б) кома, сферическая aberrация и астигматизм откорректированы за счет придания асферической формы всем поверхностям зеркал. Из-за чрезмерно высоких относительных отверстий зеркал (порядка 1:0,3) система технологически не осуществима и не может обладать хорошими оптическими характеристиками: поле зрения  $2\omega$  получается очень малым из-за ограниченных размеров центрального отверстия в выпуклом зеркале [5].

Для расчета и анализа aberrаций из пяти известных методов aberrационного расчета (метод проб, алгебраический, комбинированный, метод автоматической оптимизации и композиционный) в работе применен алгебраический метод.

Установим следующие условия нормировки для первого паракиального луча:

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_4 = 1, h_1 = 1.0, h_2 < 1, f' = 1.0.$$

Далее используем формулы, вытекающие из уравнений aberrационных полиномов [3, с. 71] для заданных условий нормировки. На первом этапе анализа получены значения конструктивных параметров системы (радиусы кривизны, высоты паракиальных лучей и расстояния между поверхностями). Установлено значение свободного коррекционного параметра  $\alpha_2$ , влияющего на конструктивное решение системы. Оно определяет величину оптической силы 1-го зеркала  $\alpha_2 = 1/f'_1$ , поэтому из технологических соображений эффективно задавать эту величину и устанавливать допустимое значение относительного отверстия главного зеркала.

Для выполнения условия Петцваля (получение плоского изображения) предложена методика расчета, которая предполагает исследование зависимости коэффициента кривизны изображения 3 порядка  $D_0$  для различных значений  $\delta$  при выборе соответствующих величин  $\alpha_2$  и  $h_2$ .

Параметр  $\delta$  определяет положение плоскости промежуточного изображения относительно поверхности 1-го зеркала. Рассмотрим четвертую сумму  $D_0$ , определяющую кривизну поля, которой можно управлять, изменяя параметры зеркальной системы (радиусы поверхностей и расстояния между ее элементами). В зеркальных анастигматах, когда коэффициент астигматизма  $C_0 = 0$ , она определяется условной величиной, называемой радиусом кривизны Петцваля  $R_p$ , и равна  $2D_0 = \frac{V_{m+1}}{R_p}$ . В общем случае, если система состоит из  $m$  зеркальных поверхностей, имеем

выражение  $\frac{V_{m+1}}{R_p} = \sum_{s=1}^{s=m} (-1)^{s+1} \frac{\sum \alpha_s}{h_s}$ , где параметр

$V_{m+1}$  описывает среду пространства изображения. Обозначим кривизну изображения 3-го порядка параметром  $\rho_p = \frac{1}{R_p}$ , а чистую кривизну  $s$ -ой зеркальной поверхности

$$\rho_s = \frac{V_s \alpha_{s+1} - V_{s+1} \alpha_s}{h_s}.$$

Очевидно, что  $\rho_p = \sum_{s=1}^m \rho_s$ , к тому же

$$V_{m+1} \rho_p = \sum_{s=1}^m \rho_s = - \sum_{s=1}^m \frac{V_{s+1} \alpha_{s+1} - V_s \alpha_s}{h_s}.$$

Тогда получим выражение  $\sum_{s=1}^{s=m} W_s = \frac{1}{2}(1 - \alpha_1^2)$ ,

которое для заданных условий нормировки

$$\text{преобразуется к виду } \sum_{s=1}^{s=p} W_s = \frac{1}{2}.$$

На втором этапе – этапе коррекции монохроматических aberrаций, использована система трех aberrационных уравнений, преобразованных с учетом полученных выше формул и описывающих исправление сферической aberrации, комы и астигматизма.

В результате проведенной анастигматической коррекции aberrаций 3-го порядка получены деформации  $\sigma_s = -e^2$ . Они определены квадратом эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка зеркальных поверхностей.

Разработаны различные варианты план-анастигматов. Конструктивные параметры одного из модулей (рис. 2) и меридиональные уравнения кривых представлены следующими значениями.

$r$	$d$
*-81,22 мм,	- 29,285 мм,
**- 6,94 мм,	134, 285 мм,
***- 67,74 мм,	

При этом меридиональные уравнения зеркал:

$$* y^2 = -162,44x - 0,79048x^2,$$

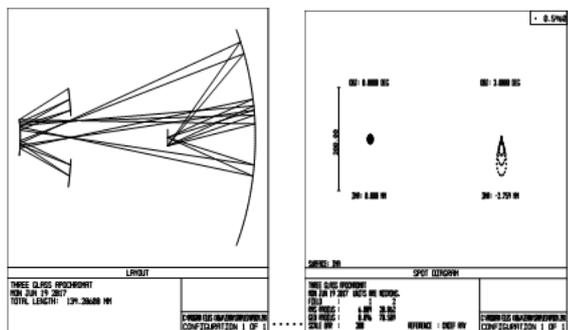
$$** y^2 = -73,88x - 4,48201x^2 + 0,788637x^3 + 0,0768239x^4,$$

$$*** y^2 = -135,48x - 0,70939x^2.$$

Aberrационные характеристики модуля для  $f' = 50$  мм;  $D/f' = 1 : 1,5$ ;  $2\omega = 6^\circ$  приведены в таблице 1.

Таблица 1. Аберрации (расчеты в ППП Orap)

m	Точка на оси			
	$\Delta S'$ , мм	$\Delta Y'$ , мм	$\eta$ , %	$2\omega$
1,0	-0,024	-0,008	-0,0750	$2^\circ$
Точка вне оси ( $2\omega=6^\circ$ )				
	$'$ , мм	$'$ , мм	$\Delta Y'$ , %	
1,0	0,013	-0,012	0,5	



а) б)  
Рисунок 2 – Двух мерное изображение хода лучей в схеме и диаграмма пятна рассеяния ( $2\omega = 6^\circ$ ).

УДК 528.8; 629.78

## МАЛОГАБАРИТНАЯ БОРТОВАЯ НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Беляев Б.И., Домарацкий А.В., Казак А.А., Кучинский П.В., Станчик В.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем

имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Минск, Республика Беларусь

В НИИПФ им. А.Н. Севченко БГУ в рамках выполнения задания НТП СГ «Мониторинг-СГ» создан экспериментальный образец малогабаритной бортовой научной аппаратуры МБНА «Структура», предназначенной для регистрации в автономном режиме с борта микроспутника изображений и параметров излучений ночного и сумеречного свечения атмосферы, а также явлений, связанных с высотными электрическими разрядами и потоками заряженных частиц. Изучение закономерностей, физических механизмов и природы транзиентных и аномальных явлений и процессов в верхних слоях атмосферы на ночной стороне Земли, связанных с чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера, является одним из приоритетных направлений космической деятельности.

МБНА «Структура» позволит решать следующие задачи:

1) Экспериментально отработать метод оптической спектрометрии явлений верхней атмосферы.

2) Исследовать методом оптической спектрометрии явления, связанные с высотными электрическими разрядами и потоками заряженных

Высокие значения МТФ и функции концентрации энергии полученной светосильной системы при достаточно больших углах поля зрения обеспечиваются отсутствием хроматизма, что подтверждается компьютерными расчетами ВПП Zemax.

1. Максудов, Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д.Д. Максудов. – М.: Наука, 1984. – 276 с.
2. Артюхина Н.К., Ключко Т. Р. Светосильный зеркальный объектив для дальнего инфракрасного диапазона // Материалы 4-й МНТК «Приборостроение 2011», г. Минск, 16–18.11.2011. – Минск: БНТУ, 2011. – С. 259 – 260.
3. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2009. – 309 с.
4. Артюхина Н.К.. Патент РБ № 17403 на изобретение «Зеркальный объектив»// Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы. – 2013. – № 4. – С. 165.
5. Артюхина Н. К., Тульева Н. Н. Трехзеркальный длиннофокусный объектив-анастигмат // Вести НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2010. – № 4. – С. 93–99.

частиц: спрайты (высоты 45–100 км); джеты (высоты 20–50 км); вспышки, обусловленные высыпаниями заряженных частиц, транзиентами, эффектами воздействия радиоволн на ионосферу.

3) Исследовать ночные и сумеречные свечения атмосферы: пространственно–временной структуры первого эмиссионного слоя (свечения гидроксидов и кислорода на высотах ~ 100 км); пространственно–временной структуры второго эмиссионного слоя (на высотах ~ 300 км); пространственно–временной изменчивости гидроксильных свечений в диапазоне высот 80–105 км; пространственно–временной структуры и спектрального состава свечений областей полярных сияний; пространственно–временной структуры и спектрального состава излучений серебристых облаков в области мезопаузы на высотах 80–86 км.

В состав МБНА «Структура» входят следующие датчики:

– датчик изображений ДИ, предназначенный для получения панхроматического изображения слабых свечений в области 0,38–1,05 мкм достаточно высокого пространственного разрешения области атмосферы при появлении в поле зрения одного из исследуемых оптических явлений;

– датчик спектральных изображений ДСИ для получения высотных распределений спектров ночных свечений гидроксила и свечений, вызванных высотными электрическими разрядами, охватывает область спектра 0,4–0,9 мкм с высоким спектральным разрешением не менее  $\Delta\lambda = 3,0$  нм;

– датчик высотных распределений свечений ДВРС-1 для регистрации пространственно-временных распределений атомарного кислорода на длине волны 556,9–557,9 нм на высотах 90 - 110 км в первом эмиссионном слое;

– датчик высотных распределений свечений ДВРС-2 для регистрации пространственно-временных распределений излучения второго эмиссионного слоя в линии кислорода на длине волны 629,5–630,5 нм на высоте 290–320 км.

Датчики снабжены блоком электроники БЭ, служащим для управления режимами работы, сжатия, записи и передачи данных. БЭ обеспечивает тестирование и управление режимами работы оптических датчиков МБНА, запись данных и служебной информации, взаимодействие МБНА с системами микроспутника.

Конструктивно все датчики МБНА размещены на общем кронштейне с параллельной ориентацией полей зрения. На рис. 1 представлен внешний вид МБНА и оптические схемы датчиков [1].

ДВРС-1 и ДВРС-2 выполнены в виде моноблоков. Между объективом и фотоприемной линейкой каждого датчика ДВРС устанавливается интерференционный светофильтр: 556,9–557,9 нм для ДВРС-1 (для регистрации зеленой линии атомарного кислорода на высотах около 100 км) и 629,5–630,5 нм для ДВРС-2 (для регистрации красной линии кислорода на высотах около 300 км).

ДСИ включает в себя полихроматор на базе вогнутой сферической дифракционной решетки с проекционным объективом. В качестве приемного элемента используется малоформатная матрица.

ДИ включает в себя высокочувствительную камеру на основе CMOS-матричного приемника и объектив.

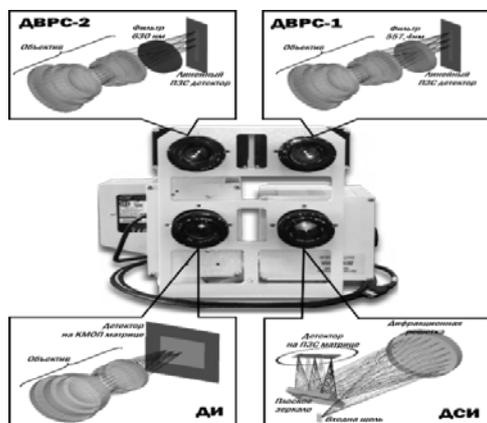


Рисунок 1 – Внешний вид МБНА «Структура» с оптическими схемами датчиков

Для управления МБНА разработана программа APKStruct.exe. Программа написана в среде Qt 5.5 с использованием языка C++ и работает под управлением операционной системы Windows 7. Программа APKStruct.exe состоит из взаимосвязанных и определенных общим пользовательским интерфейсом модулей (компонент), которые обеспечивают функционирование МБНА.

Управление модулями МБНА осуществляется по интерфейсу USB. Подключение модулей МБНА осуществляется в момент запуска программы, при этом на экране отображается основное окно программы (рис. 2).

Основное окно программы для регистрации данных МБНА представляет собой поле, поделенное на четыре подокна. Каждое подокно содержит модуль отображения данных, в который выводятся данные, получаемые с каждого модуля МБНА. Получаемые данные подписаны в соответствии с источником. Кроме отображения данных, модуль отображает режимы работы МБНА, параметры получаемых данных.

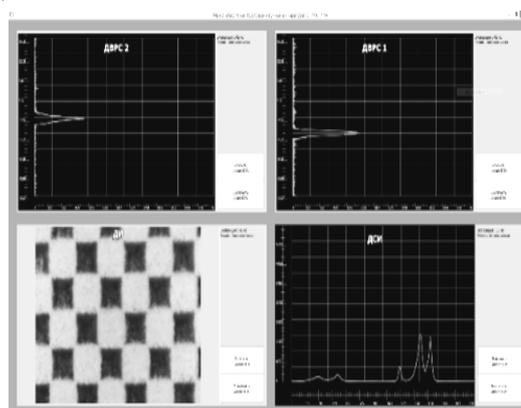


Рисунок 2 – Внешний вид основного окна программы



Рисунок 3 – КПА МБНА «Структура»

Для осуществления функциональной диагностики работоспособности МБНА на всех стадиях наземной отработки была изготовлена контрольно-поверочная аппаратура КПА (рис. 3).

КПА обеспечивает имитацию следующих оптических сигналов:

– пространственное распределение свечений зеленой линии первого эмиссионного слоя на длине волны 556,9–557,9 нм (контроль датчиком высотных распределений свечений ДВРС-1);

- пространственное распределение свечений второго эмиссионного слоя в красной линии кислорода на длине волны 629,5–630,5 нм (контроль датчиком высотных распределений свечений ДВРС-2);
- излучение на трех длинах волн в диапазоне 400–900 нм (контроль датчиком спектральных изображений ДСИ);
- излучение изображения тестовой миры.

УДК 621.383.534

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТООТКЛИКА СУБМИКРОННОГО КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Борздов А.В., Борздов В.М.

Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

Современные кремниевые полупроводниковые структуры и МОП-транзисторы являются перспективными оптоэлектронными приборами для использования в качестве детекторов излучения видимого и инфракрасного диапазонов, фототранзисторов и фотосенсоров [1–4]. При этом повышенный интерес к МОП-транзисторам обусловлен рядом причин, в частности возможностью простой интеграции таких приборов в интегральные схемы и их дальнейшей миниатюризацией, низким энергопотреблением и достаточно высокой чувствительностью при более низком уровне шумов по сравнению с лавинными фотодиодами. Относительно недавно продемонстрировано использование глубоко субмикронных интегральных МОП-транзисторов со структурой “кремний-на-изоляторе” (КНИ-МОП-транзисторов) в качестве детекторов излучения, работающих в режиме счета одиночных фотонов при комнатной температуре [5].

Для исследования рабочих характеристик фотодетекторов и фототранзисторов в течение достаточно длительного времени широко применяется самосогласованное моделирование на основе метода Монте-Карло. Преимуществом использования многочастичного метода МонтеКарло является возможность прослеживания траекторий движения носителей заряда в пространстве координат и импульсов при различных условиях, и расчет соответствующих функций распределения, плотностей заряда и напряженностей электрических полей, а также возможность непосредственного включения и учета различных процессов рассеяния и генерации носителей заряда в приборных структурах [6].

При исследовании рабочих характеристик фотодетекторов и фототранзисторов интерес представляет, в частности, время отклика фототока при воздействии импульса излучения определенной мощности и длительности, поскольку это время определяет быстродействие прибора. В настоящей работе проведено моделирование воздействия коротких импульсов лазерного излучения различной мощности на величину тока в канале субмикронного КНИ-МОП-транзистора. Объектом моделирования

При проведении испытаний МБНА устанавливается на общем кронштейне и юстируется с объективами и блендами КПА.

1. Beliaev, B. The multisensor payload «Structura» for the observation of atmospheric night glows from the ISS board / B. Beliaev, Y. Krot, L. Katkovsky // Proc. SPIE 10000, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XX, 100001U (October 19, 2016); doi:10.1117/12.2241791, Edinburgh, United Kingdom, October 19, 2016.

является КНИ-МОП-транзистор, сходный по структуре с исследованным в [5] в качестве однофотонного фотодетектора и аналогичный рассмотренному нами ранее в [7, 8]. Схематическое сечение транзистора представлено на рисунке 1. Размеры моделируемых областей следующие: длина канала равна 100 нм, его толщина  $W_c = 50$  нм, толщина подзатворного окисла – 5 нм, толщина скрытого окисла  $W_b = 145$  нм, толщина подложки  $W_{sub} = 200$  нм. Уровень легирования канала акцепторной примесью равен  $10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Температура моделирования – 300 К.

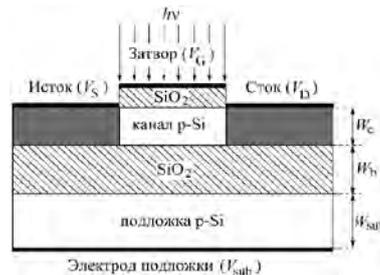


Рисунок 1 – Структура моделируемого КНИ-МОП-транзистора

Предполагалось, что лазерное излучение с длиной волны 532 нм направлено перпендикулярно плоскости затвора транзистора и охватывает только область канала. Длительность лазерного импульса равна 1 пс.

В качестве приближения мы полагали, что металлизация затвора достаточно тонкая, и ее можно считать прозрачной для используемого излучения. Коэффициент поглощения излучения в Si, а также оценка коэффициентов отражения на границах раздела Si-SiO<sub>2</sub> взяты на основании данных из [9, 10]. Напряжения на затворе  $V_G$  и подложке  $V_{sub}$  равны нулю. Все напряжения подавались относительно истока ( $V_S = 0$ ).

На рисунке 2 в качестве примера приведены зависимости фототока в канале транзистора от времени при напряжении на стоке  $V_D = 0,5$  В для различных интенсивностей излучения. Для рассматриваемого напряжения на стоке процессы ударной ионизации в канале транзистора не

существенны, и лавинное умножение носителей заряда можно исключить. Предполагалось, что лазерное излучение включается в момент времени  $t = 0$  и в течение 1 пс действует с постоянной интенсивностью [3]. При этом до начала воздействия излучения моделирование проводилось в течение некоторого времени, достаточного для установления стационарного процесса переноса носителей заряда в канале транзистора.

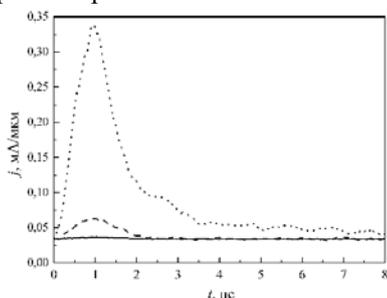


Рисунок 2 – плотность фототока  $j$  при воздействии импульсов лазерного излучения с различной интенсивностью  $I$ . Сплошная кривая –  $I = 5 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, штриховая –  $I = 5 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, точечная –  $I = 5 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>

Как видно из рисунка, после окончания воздействия излучения ( $t > 1$  пс) стационарное значение темнового тока достигается приблизительно через 8 пс для наибольшей мощности излучения. Как показали проведенные расчеты, определенный заряд сгенерированных излучением электронов и дырок сохраняется еще в течение некоторого времени после снятия действия излучения и после того, как ток спадает до значения темнового. Причем чем больше мощность излучения, тем больше это время. Заметим, что сохранение заряда сгенерированных носителей в канале в течение некоторого времени после спада фототока до темнового значения наблюдается также и в фотодиодах со структурой “металл-полупроводник-металл” и объясняется эффектом динамического экранирования в электронно-дырочной плазме [6]. При этом в отличие от фотодетекторов на основе GaAs [6] отклик тока в КНИ-МОП-транзисторе практически в равной степени обусловлен как электронной, так и дырочной составляющими для всех рассмотренных значений интенсивности излучения. Как можно видеть из рисунка 2, для  $t > 3$  пс на графике зависимости плотности тока от времени наблюдаются заметные флуктуации плотности тока при наибольшей мощности

излучения. Является ли это следствием процессов, происходящих в электронно-дырочной плазме, либо обусловлено вычислительными особенностями самосогласованного моделирования, требует дальнейшего выяснения.

Таким образом, проведенные расчеты отклика фототока в субмикронном КНИ-МОП-транзисторе с длиной канала 100 нм при воздействии лазерного излучения пикосекундной длительности с длиной волны 532 нм и интенсивностями  $5 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>,  $5 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> и  $5 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> показали, что время затухания фототока зависит от интенсивности излучения и для максимального рассмотренного ее значения составляет около 8 пс. Также установлено, что в течение определенного времени после спада фототока до значения темнового тока в канале транзистора сохраняется некоторый заряд сгенерированных излучением электронов и дырок, что может быть обусловлено эффектами динамического экранирования в электронно-дырочной плазме.

- Jain, P. Power Gain Analysis of Optically Illuminated MOSFET / P. Jain, B.K. Mishra, G. Phade // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 51, No. 16. – P. 50–54.
- Gautam, R. / R. Gautam [et al.] // Journal of Semiconductor Technology and Science. – 2013. – Vol. 13, No. 5. – P. 500–510.
- Shiri, D. Photoconductive response of strained silicon nanowires: A Monte Carlo study / D. Shiri, A. Verma, M.M. Khader // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – P. 133708-1–133708-9.
- Golam Rabbani, M. Photoresponse of silicon with asymmetric area contacts / M. Golam Rabbani [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 2017. – Vol. 32. – P. 1–6.
- Du, W. Single-Photon Detection by a Simple Silicon-on-Insulator Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor / W. Du [et al.] // Jap. J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 51. – P. 06FE01-1–06FE01-4.
- Mogestue, C. Monte Carlo simulation of semiconductor devices / C. Mogestue. – Springer, 1993. – 334 p.
- Borzdov, A.V. Monte Carlo simulation of hot electron transport in deep submicron SOI MOSFET / A.V. Borzdov, V.M. Borzdov, V.V. V'yurkov // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 9440. – P. 944013-1–944013-7.
- Borzdov, A.V. Numerical simulation of electric characteristics of deep submicron silicon-on-insulator MOS transistor / A.V. Borzdov, V.M. Borzdov, N.N. Dorozhkin // Devices and Methods of Measurements. – 2016. – Vol. 7, No 2. – P. 161-168.
- Aspnes, D.E. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV / D.E. Aspnes, A.A. Studna // Phys. Rev. B. – 1983. – Vol. 27, No 2. – P. 985–1009.
- Wang, H. Absorption Coefficients of Crystalline Silicon at Wavelengths from 500 nm to 1000 nm / H. Wang, X. Liu, Z.M. Zhang // Int. J. Thermophys. – 2013. – Vol. 34. – P. 213–225.

УДК 621.382:621.373.820

## СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СИНИХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Бобученко Д.С.<sup>1</sup>, Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Цвирко В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

Исследовались InGaN/GaN светодиоды синего свечения мощностью 5 Вт с множественными квантовыми ямами фирмы Philips LXC2-PB14-

P00 [1]. Измерения проводились при токе 10 мА. Измерения проводились на специализированном спектрометрическом оборудовании в

Центре светодиодных и оптоэлектрических исследований НАН Б. Измерение спектральной силы излучения и силы излучения от светодиодов проводились согласно условиям А и В МКО.

На рисунке 1 показаны спектры силы излучения СИД в осевом направлении при различных температурах окружающей среды (от -196 - 50 °С). При температурах 20-50 °С, спектральная сила излучения в максимуме уменьшается с увеличением температуры, что, вероятно, связано с термическим выбросом носителей заряда из квантовых ям и увеличением вклада безызлучательных рекомбинационных процессов. Положение максимума смещается в сторону более низких энергий, что связано с термическим сужением ширины запрещенной зоны. При понижении температуры до 78 К имеет место смещение максимума спектра в высокоэнергетическую область, и появлением дополнительной составляющей спектра.

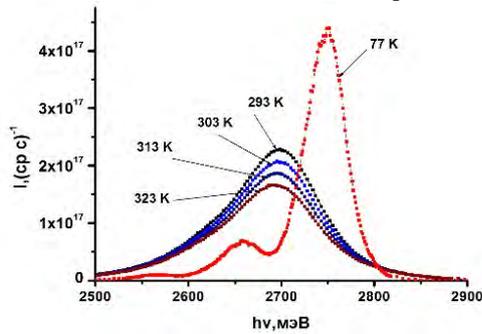


Рисунок 1 – Зависимость спектральной силы излучения СИД от энергии фотонов

На рис.2 показаны значения силы излучения СИД в осевом направлении от температуры окружающей среды. Она имеет нелинейный характер. Уменьшение силы излучения в осевом направлении СИД при азотной температуре вероятно связано с изменением оптической силы,

и, следовательно, диаграммы направленности СИД в жидком азоте.

Рис.3 показывает зависимость длины волны, на которую приходится максимум спектра от температуры окружающей среды. Она имеет линейный характер. Увеличение длины волны при увеличении температуры составляет 0.0386 нм/°К.

Таким образом, в работе установлены особенности изменения оптических характеристик мощных InGaN/GaN СИД от температуры окружающей среды.

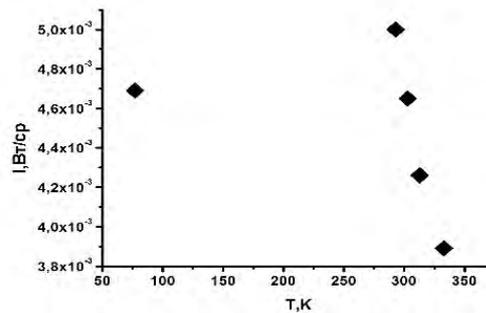


Рисунок 2 – Значения силы излучения в осевом направлении СИД от температуры окружающей среды

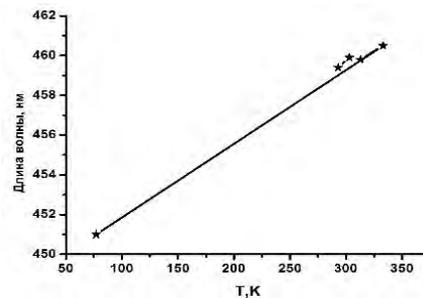


Рисунок 3 – Зависимость длины волны, на которую приходится максимум спектра от температуры окружающей среды

1. www.luxeon.com. Power light source LUXEON K2. Technical Datasheet DS51

УДК 53.082.53

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ШУМА В ПРОЦЕДУРЕ АНАЛИЗА ПО МЕТОДУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Бручковский И.И., Демин В.С., Красовский А.Н.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь

Для дистанционного мониторинга малых газовых составляющих в атмосфере широко применяется метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (DOAS – Differential Optical Absorption Spectroscopy) [1]. Метод DOAS использует спектры яркости рассеянного солнечного излучения из различных участков небесной сферы, классифицируется как пассивный метод дистанционного зондирования. Результатом применения данного метода к

зарегистрированным спектрам являются наклонные содержания (SCD), которые представляют собой интегральную концентрацию исследуемой малой газовой составляющей вдоль неизвестного пути света по всем возможным путям при данной геометрии наблюдений.

Наклонные содержания измеряемой малой газовой составляющей для различных углов возвышения рассчитываются относительно опорного спектра, поэтому метод DOAS не

требует измерений спектров яркости в абсолютных единицах.

На практике расчет наклонных содержаний происходит относительно опорного спектра (обычно его выбирают в полдень того же дня) и такие наклонные содержания называют дифференциальными наклонными содержаниями (англ. DSCD).

Для реализации метода DOAS с целью мониторинга таких малых газовых составляющих как двуокись азота, димер кислорода, вода, озон, формальдегид, глиоксаль, в мировой практике используют спектры с разрешением 0.3 - 1.5 нм в интервале длин волн 320 - 490 нм. При этом задача мониторинга делится на две задачи: расчет DSCD и восстановление из полученных DSCD вертикальных профилей аэрозольной оптической толщи и исследуемой малой газовой составляющей. Последняя задача решается при помощи модели переноса излучения в атмосфере. В данной работе акцент делается на деталях расчета DSCD, а именно на исследовании остаточного спектра.

Актуальность данной работы состоит в том, что знание и учет ошибок на этапе определения DSCD снижает неопределенность начальных условий при решении обратной задачи с привлечением модели переноса излучения, что, в конечном итоге, улучшает точность и чувствительность в определении профилей аэрозольной оптической толщи и исследуемой малой газовой составляющей. Основной характеристикой качества проведения расчетов по методу DOAS является остаточный спектр (англ. *residual*) и его характеристика: среднеквадратичное отклонение (англ. RMS).

Исследованию спектрального шума в процедурах DOAS-анализа посвящена работа Й. Лампеля [2] и его доклад на конференции 7-th DOAS Workshop (2016) [3], в результате чего методом анализа главных компонент из остаточных спектров выделена спектральная структура, которая имеет следующие свойства:

- не зависит от использованных сечений поглощения димера кислорода;
- почти идентична для разных измерительных приборов;
- наблюдается на различных широтах;
- имеет амплитуду единиц оптической толщины;
- находится в тропосфере.

Для практической реализации метода DOAS, в НИИЦ МО БГУ был разработан зеркально-линзовый прибор MARS-B, являющийся многоосевым регистратором спектров (Multi Axis Recorder of Spectra) рассеянного солнечного света [4], собранный на базе спектрографа изображения ORIEL MS257 [5], отличающийся тем, что в качестве второго элемента телескопа используется первое зеркало спектрографа. Этот

прибор показал хорошее качество получаемых данных в ходе международной кампании сравнений MAD-CAT 2013 [6].

Данные прибора MARS-B использовались в том числе для восстановления профилей азотистой кислоты в тропосфере [7]. Азотистая кислота находится на пределе обнаружения для метода DOAS, поэтому проводились попытки предварительной математической обработки спектров с целью уменьшить шумовую составляющую. Для этого применялся цифровой фильтр низких частот (фильтр Кайзера [8]), который имеет четыре параметра: крутизну спада, отрезающую частоту, полосу пропускания и количество итераций.

На одном из этапов подбора параметров фильтра, было замечено, что в остаточном спектре, присутствует повторяющаяся структура (см. рисунок 1), причем спектрально особенности этой структуры не зависят от места проведения измерений (измерения проводились в Голландии, Германии и в Беларуси в разное время) а ее амплитуда меняется в течение дня.

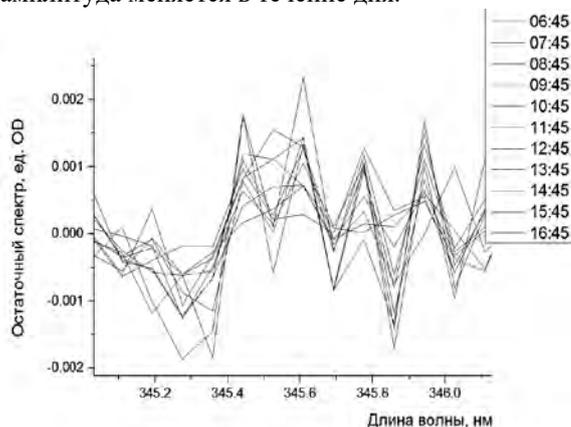


Рисунок 1 – Увеличенный фрагмент остаточного спектра, полученного в ходе DOAS-анализа спектров, зарегистрированных с интервалом в 1 час в течение светового дня 21.09.2016

Стоит также отметить, что обнаруженная структура по своему спектральному составу очень похожа на ту, что была получена другим, независимым методом, и продемонстрирована в работах [2, 3].

#### Выводы:

- Среднее дневное значение RMS без применения фильтра всегда больше чем с фильтром, что свидетельствует о постоянном наличии в обрабатываемых спектрах высокочастотной шумовой компоненты; тот факт что спектр шума не зависит от времени дня говорит о том, что шум создается внутри прибора.
- Применение специально подобранного для конкретного прибора фильтра позволяет улучшить качество входных данных для расчетов по методу DOAS.
- Показано, что предварительная математическая обработка может интерпретироваться как

результат измерения прибором, характеристики которого превышают предельно достижимые для реального прибора (снижение RMS без ущерба для рассчитываемых DSCD).

• Независимым способом в остаточных спектрах обнаружена спектральная структура, похожая на ту, что выделил Й. Лампель.

1. Platt, U. Differential Optical Absorption Spectroscopy Principles and Applications / U. Platt, J. Stutz. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 597 p.
2. Lampel J., Lübcke P., Zielcke J., Platt U. Analyzing residual spectra using Principal Component Analysis // 4-th DOAS Workshop, Boulder, 2013.
3. Lampel J., Lübcke P., Warnach S., Frieß U., Platt U., Beirle S., Wagner T. How much information is hidden in residual spectra of DOAS fits? // 7-th DOAS Workshop, Brussels, 2016.

4. Бручковский И. И., Боровский А. Н., Демин В. С., Красовский А. Н. Прибор для дистанционной регистрации двуокси азота в атмосфере // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2013. № 1. С. 41–45.
5. Oriel MS257™ 1/4 m Monochromator and Imaging Spectrograph [Electronic resource] // Newport Corporation 1996–2015. URL: <http://www.newport.com/MS257153-1-4-m-Monochromator-and-Imaging-Spectrograph/378367/1033/info.aspx> (date of access: 24.03.2017).
6. Бручковский И.И., Красовский А.Н., Демин В.С. Зеркально-линзовый прибор MAX-DOAS: результаты международных сравнений MAD-CAT 2013 // Вестник БГУ, Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2015. №3. С.44 – 49.
7. Y.Wang et al. Inter-comparison of HONO profiles derived from MAX-DOAS observations during the CINDI-2 campaign // 8-th DOAS Workshop, Yokohama, 2017.
8. Kaiser J., Reed W. Data smoothing using low-pass digital filters // Review of Scientific Instruments, Volume 48, Issue 11, P. 1447-1457 (1977).

УДК 535.8

## ПАНОРАМНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР СКАНИРУЮЩЕГО ТИПА

Власовец Н.С.<sup>1</sup>, Козерук А.С.<sup>1</sup>, Кудряшов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Пеленг», Минск, Республика Беларусь

Лазерная локация является составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии и в наши дни находит применение во многих отраслях народного хозяйства, в частности, в решении задач инженерного проектирования, панорамного мониторинга и бурно развивается во многих странах мира [1].

Использование метода лазерной локации, совмещенного с цифровой видеосъемкой, спутниковой навигацией и геопозиционированием, сопровождаемого цифровой спутниковой съемкой в оптическом и радио диапазонах и интегрированных в геоинформационных системах для целей дистанционного наблюдения за обстановкой на границе, что позволяет проводить дистанционный мониторинг участка с высокой эффективностью при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и финансовых средств.

Обработка огромных массивов данных лазерного зондирования (сотни гигабайт дискового пространства) выполняется на компьютерах в режиме реального времени, т.е. одновременно или почти одновременно с выполнением измерений. Все этапы выполнения лазерно-локационных съемок, начиная с приборного обеспечения, построения, обновления, совершенствования опорной геодезической сети, наземной калибровки и заканчивая обработкой и архивированием получаемых материалов, созданием и наполнением баз данных геоинформационных систем, результирующей картографической продукции и цифровых трехмерных моделей местности и объектов, требуют совершенствования существующих конструкций лидаров, с целью возможности слежения за быстро движущимися объектами в пространстве.

Преимущества лазерно-локационного метода:

1. Технологическая простота, короткий технологический цикл. Материалы сканирования охраняемого участка представлены как совокупности (облака) лазерных точек, разделенные по их морфологической принадлежности (земля, растительность, поверхности водоемов, кровли зданий, провода и др.), цифровые модели рельефа, а также многие контурные объекты и модели географических объектов в трехмерном представлении. Все упомянутые материалы уже в момент возникновения полностью координированы, т.е. определены в некоторой заранее заданной системе геодезических или географических координат и в дальнейшем принципиально не требуется проведения никаких дополнительных мероприятий по координатной коррекции или преобразованию. Также важно то, что на практике подготовка всех этих материалов осуществляется в полевых условиях, в результате чего собственно камеральная фаза обработки начинается в существенно более подготовленных условиях, что, в свою очередь, также способствует сокращению технологического цикла.

2. Гарантии точности. В большинстве случаев точность специфицируется на уровне 15 см по плановым и высотным координатам, причем специально указывается, что речь идет об абсолютной геодезической точности. Такой уровень точности является безусловно достаточным для чрезвычайно обширного класса приложений, в частности для создания топографических планов, вплоть до масштаба 1:1000 включительно.

3. Высокая производительность. Производительность лазерно-локационного метода чрезвычайно высока. На практике достигнута производительность сканирования в 500–600 км за один аэросъемочный день для линейных объектов и в

500–1000 км<sup>2</sup> для площадных объектов. Приведенные цифры требуют корректной интерпретации, так как производительность, кроме всего прочего, зависит от заданных условий съемки, таких, как ширина полосы захвата, плотность (количество лазерных точек на единицу поверхности), и др. В той же самой степени производительность лазерного сканирования прямо зависит от заданного масштаба фотографирования. В случае лазерной локации практически эквивалентными оказываются производительность как собственно сканирующих работ, так и базовых процедур обработки (темп сбора данных в основном соответствует темпу их обработки).

4. Возможность работы в ночное время и в любое время года. Эта возможность вытекает из того факта, что лидар является активным средством дистанционного зондирования, т.е. регистрирует собственное, а не отраженное солнечное излучение.

В современной лазерной локации используются два основных метода измерения наклонной дальности – импульсный и фазовый (в лидарах воздушного базирования в настоящее время используется только импульсный метод, а в наземных лидарах – и импульсный, и фазовый).

В импульсном методе по возможности, должна быть обеспечена минимальная длительность зондирующего импульса и его максимальная добротность (т.е. максимально крутой передний фронт). Совершенно аналогичные требования к форме зондирующего импульса предъявляются в радиолокации и других технологиях активного зондирования.

Как и во всех других родственных технологиях, в лазерной локации принято считать, что импульсный метод проигрывает по точности фазовому. Это происходит потому, что фактическая точность каждого измерения зависит от ряда параметров, каждый из которых может оказать на точность конкретного измерения. Таковыми параметрами являются:

- длительность и форма (в частности, крутизна переднего фронта) зондирующего импульса;
- отражательные характеристики объекта;
- оптические свойства атмосферы;
- текстура и ориентация элементарной поверхности объекта вызвавшей отражение зондирующего луча по отношению к линии визирования.

Влияние всех перечисленных выше параметров сводится к ослаблению «размыванию» формы отраженного импульса на входе оптической схемы приемника, т.е. к возрастанию неопределенности в измерении длительности задержки распространения зондирующего импульса до объекта и обратно. Повышение этой неопределенности на практике

оборачивается снижением точности. Фазовый метод во многом свободен от этого недостатка.

Излучение лидаров представляет угрозу для здоровья людей в смысле возможного поражения органов зрения и ожогов кожи. Причем на практике наибольшее внимание уделяется только угрозе зрению случайных наземных наблюдателей, так как ожоги кожи возможны только на очень близких расстояниях (первые метры), т.е. только в лабораторных условиях, где с прибором работает специально обученный персонал с соблюдением всех норм безопасности. Вопросы безопасного использования лидаров оказывают существенное влияние на методику выполнения лазерно-локационной съемки и обеспечение безопасности на практике сводится к определению минимально допустимой высоты полета, которое для некоторых моделей лидаров может составлять несколько сотен метров. Понятно, что это ограничение существенно, так как высота съемки является одним из главных параметров, прямо влияющих на детальность (плотность сканирования), точность и ширину полосы захвата.

Создание современной интегрированной системы, включающей в свой состав наблюдательный панорамный прибор сканирующего типа, работающий по импульсному методу, обеспечивает надежный контроль охраняемой территории и дает возможность слежения за быстро движущимися объектами как в дневное, так и в ночное время суток. В таком приборе дальность обнаружения движущегося в воздушном пространстве объекта (0,5×0,5×0,5 м), составляет не менее 5000 м, а распознавания – 4000 м. При этом обеспечивается передача полученной информации с периферийной части на станционную без задержек.

Основные возможности панорамного наблюдательного прибора сканирующего типа:

- обнаружение и отслеживание быстро движущихся объектов в воздушном и наземном пространстве;
  - подробная информация о положении, движении и форме окружающих объектов, а также о статических фоновых объектах;
  - распознавание и классификация объектов.
- В сканирующих панорамных наблюдательных приборах в качестве основных оптических элементов развертки используются:
- качающееся зеркало;
  - вращающаяся призма;
  - оптический клин.

Что касается простоты технической реализации, то все рассматриваемые схемы сканирования не представляют никаких проблем по этой позиции. Везде используется один или два движущихся оптических элемента, которые совершает колебания или вращаются с постоянной угловой скоростью. Это обстоятельство облегчает юстировку и в

значительной степени способствует стабильности и надежности работы оптической системы.

1. Медведев Е.М., Данилин Е.М., Мелиников С.Р. Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.

УДК 539.264

## СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ $\text{Er}^{3+}:\text{K}_2\text{YF}_5$ , СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Вилейшикова Е.В.<sup>1</sup>, Лойко П.А.<sup>2</sup>, Хайдуков Н.М.<sup>3</sup>, Юмашев К.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ИОНХ РАН, Москва, Россия

Кристаллы сложных фторидов с общей формулой  $\text{M}_2\text{LnF}_5$  кристаллизуются в системе  $\text{MF} - \text{LnF}_3$ , где  $\text{M} = \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$  и  $\text{Ln} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Lu}$ . Они обладают качествами радиационно стойких, прозрачных в широкой спектральной области, низкофононных оптических матриц. Благодаря возможности частичного замещения кристаллографических позиций “нейтральных” редкоземельных ионов ( $\text{Y}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Lu}^{3+}$ ) оптически активными ионами ( $\text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$  и др.) без формирования ионных вакансий, структурным особенностям и низким значениям энергий фононов кристаллической решетки ( $\sim 400 \text{ см}^{-1}$ ), данные кристаллы перспективны как лазерные среды и, как и большинство фторидных кристаллов, как ап-конверсионные люминофоры.

Основным методом синтеза кристаллов  $\text{RE}^{3+}:\text{K}_2\text{YF}_5$  является синтез в гидротермальных условиях. Традиционные направленные методы, такие как методы Чохральского, не позволяют эффективно синтезировать объемные кристаллы  $\text{K}_2\text{REF}_5$ , ввиду ограничений кристаллической системы. Однако, по причине гигроскопичности кристаллов сложных фторидов, гидротермальный синтез может стать причиной ухудшения качества оптических матриц ввиду включения в структуру существенного количества ОН групп. Включение ОН групп в упорядоченную структуру  $\text{K}_2\text{REF}_5$ , может сопровождаться формированием дефектов, а также разнообразить фононный спектр высокочастотными модами, что окажет влияние на тепловые свойства матрицы. Это является потенциальным препятствием для разработки как лазерных материалов, так и ап-конверсионных люминофоров на основе данных кристаллов.

В работе исследованы структурные свойства кристаллов сложных пентафторидов  $\text{K}_2\text{YF}_5$ , активированных ионами  $\text{Er}^{3+}$ , в зависимости от температуры. Для экспериментов был изготовлен концентрационный ряд сложных фторидов  $\text{K}_2\text{YF}_5$ , синтезированных в гидротермальных условиях в Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (Москва, Россия). Для гидротермальных экспериментов использовался автоклав объемом  $\sim 40 \text{ см}^3$ , с разделенной перфорированной диаграммой зоной растворения и кристаллизации. Кристаллы

формировались под действием температурного градиента (температура в зоне кристаллизации  $\sim 750 \text{ K}$ , температурный градиент  $> 3 \text{ K/см}$  и давление  $\sim 100 \text{ МПа}$ ) в результате реакции в водном растворе, содержащем 40–50 мол. %  $\text{KF}$  и  $\text{LiF}_3$ , а также смесь оксидов  $(1-x)\text{Y}_2\text{O}_3 - x \text{Er}_2\text{O}_3$ , где  $x = 1, 0.1, 0.05, 0.02$ . В результате спонтанной кристаллизации получен концентрационный ряд кристаллов  $\text{Er}:\text{K}_2\text{YF}_5$ , размер которых составил  $\sim 5\text{-}10 \text{ мм}$ , рисунок 1.



Рисунок 1 – Фотография экспериментальных образцов кристаллов 10 ат. %  $\text{Er}^{3+}:\text{K}_2\text{YF}_5$

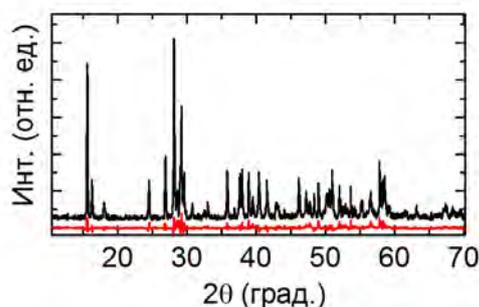


Рисунок 2 – Рентгенограмма  $\text{K}_2\text{YF}_5$  (303 К) и разница между расчетной и экспериментальной рентгенограммой

Для структурных исследований методом анализа рентгенограмм образцы тщательно перетирались в порошок. Рентгенограммы регистрировались на электронном диффрактометре Bruker D8 Advance X-Ray diffractometer с  $\text{Cu K}\alpha$  излучением в диапазоне температур 303 К до 775 К. Анализ рентгенограмм показал, что структура кристаллов принадлежит ромбической сингонии (пр. гр.  $\text{Pn}21a$ , #33). Параметры кристаллической ячейки уточнялись методом Ритвельда с использованием средств программного обеспечения HighScore PLUS (PANalytical). В процедуре уточнения участвовало три коэффициента нулевой линии  $a_0, a_1$  и  $a_2$ ,

приборная погрешность смещения образца, масштабный параметр, параметры элементарной ячейки  $a$ ,  $b$  и  $c$ , профильные параметры  $U$ ,  $V$  и  $W$  и относительные координаты атомов  $x/a$ ,  $y/b$  и  $z/c$ . Также рассматривались тепловые параметры атомных позиций фтора и иттрия. Результат уточнения структуры  $K_2YF_5$  при комнатной температуре приведен на рисунке 2.

Согласно полученным результатам, структура низкосимметричных пентафторидов  $K_2LnF_5$ , где  $Ln = Y, Er$ , выглядит следующим образом. Сильно искаженные полиэдры  $LnF_7$  (симметрия позиции  $Ln^{3+}$ :  $C_1$ ) формируют цепочечную структуру вдоль оси  $b$ , объединяясь общими ионами фтора F. Ионы  $K^+$  заполняют позиции нижней симметрии  $C_1$ , распределяясь вдоль цепочек  $LnF_7$ . В ромбических кристаллах  $K_2LnF_5$  полиэдры  $LnF_7$  делят по две грани, в результате чего в структуре формируются изолированные друг от друга цепочки, удаленные друг от друга на существенное расстояние  $> 6.3 \text{ \AA}$ , при этом межионные расстояния  $Ln^{3+}-Ln^{3+} < 3.8 \text{ \AA}$ , рисунок 3. Ионы фтора, не участвующие в формировании соединений между полиэдрами, участвуют в формировании связей с  $K^+$  и возможными примесями. Для соответствующих кристаллографических позиций атомов F определена сильная анизотропия тепловых параметров  $B_{ij}$ . Кроме того, в некоторых пиках обнаружено слабое расщепление, что говорит о слабом понижении симметрии структуры.

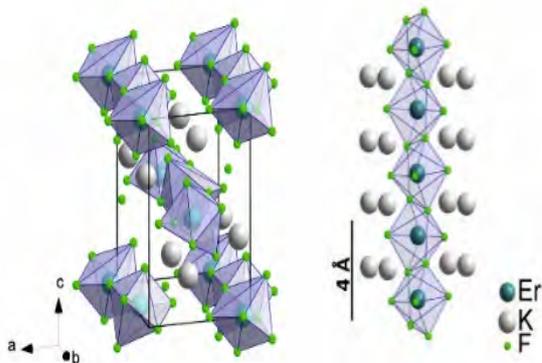


Рисунок 3 – Структура кристаллов  $K_2ErF_5$

Таблица 1 – Параметры элементарной ячейки кристалла  $K_2YF_5$  в зависимости от температуры

$T, K$	$a, \text{ \AA}$	$b, \text{ \AA}$	$c, \text{ \AA}$	$V, \text{ \AA}^3$
303	10.8021(8)	6.6130(6)	7.2645(1)	518.022
373	10.8295(8)	6.6145(2)	7.2820(4)	521.633
473	10.8732(7)	6.6405(1)	7.2981(1)	526.956
573	10.9154(6)	6.6639(2)	7.3161(4)	532.179
673	10.9698(2)	6.6939(7)	7.3375(8)	538.810
773	11.0105(2)	6.7199(4)	7.3561(1)	544.278

Ввиду некоторой гигроскопичности многих сложных фторидов, в том числе и исследуемого  $K_2YF_5$ , а также спецификой гидротермального метода синтеза, в рентгенограммах некоторые

пики идентифицируются как фаза гидрофторидов. Массовая доля побочных фаз не превышает 2% во всех образцах. Уточненные значения параметров структуры исследуемых кристаллов приведены в таблице 1. Параметры элементарной ячейки вместе с объемом монотонно увеличиваются с ростом температуры. Такое поведение хорошо согласуется с рассчитанными структурными параметрами в рамках метода функционала плотности [1] для  $K_2YF_5(OH)$ , где OH группа встраивается в структуру, образуя связь  $O-Y^{3+}$  в плоскости (002).

Коэффициенты теплового расширения, линейные  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$  и  $\alpha_c$  и объемный  $\alpha_V$ , определяются из температурных зависимостей параметров элементарной ячейки, рис. 4, как

$$\alpha(T) = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad \alpha_V(T) = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}; \quad (1)$$

$$L(T) = L_{303K} \exp \left[ \int_{303K}^T \alpha(T) dT \right], \quad (2)$$

где  $L_{303K}$  – длина в определенном направлении кристаллической ячейки при комнатной температуре ( $T = 303 \text{ K}$ ). При этом предполагалось, что коэффициенты расширения не зависят от температуры.

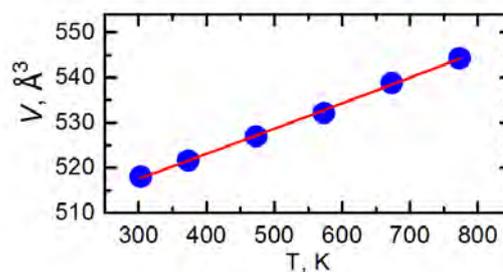


Рисунок 4 – Объем элементарной ячейки кристалла  $K_2YF_5$  в зависимости от температуры

Для трех кристаллографических направлений  $a$ ,  $b$  и  $c$  линейные коэффициенты теплового расширения  $\alpha_a = 4.12$ ,  $\alpha_b = 3.84$  и  $\alpha_c = 2.53 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  соответственно. Существенный объемный коэффициент теплового расширения  $\alpha_V = 10.59 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  может быть объяснен гигроскопичностью данных кристаллов, присутствием включений в виде OH групп в структуре пентафторида  $K_2YF_5$ .

Хотя все результаты подтверждают включение в структуру OH, помимо возможного тушения люминесценции, это может также стать причиной более эффективного переноса энергии между оптически активными ионами  $Er^{3+}$  в плоскости (002) и в пределах цепочечной структуры из полиэдров  $LnF_7$ . В дальнейшем, для характеристики эффективности этих процессов, планируется более детальное исследование фононного спектра в  $K_2YF_5$  и в  $K_2YF_5(OH)$  и исследование спектрально-кинетических свойств ап-конверсионной

люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  в  $\text{K}_2\text{YF}_5$  с учетом поляризации света.

Настоящая работа выполняется с поддержкой Белорусского фонда фундаментальных исследований (проект №Ф17МС-012).

1. An ab initio density functional theory calculations on the  $\text{K}_2\text{YF}_5$  crystal containing hydroxyl impurities / A.A. Gallegos-Cuellar, R. Licona-Ibarra, J.F. Rivas-Silva, A. Flores-Riveros, J. Azorín Nieto, J.F. Casco-Vásquez // Journal of Molecular Structure. – 2013. – V. 1051 – P. 177 – 179.

УДК 621.385.6

## LASER PHOTOTHERMOACOUSTIC MICROSCOPY VERIFICATION

Wolkenstein S. S.<sup>1</sup>, Khmyl A. A.<sup>2</sup>, Kerentsev A.F.<sup>3</sup>, Kovalchuk N.S.<sup>3</sup>, Solovjov J.A.<sup>3</sup>, Rubtsevitch I.I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PJSC “PLANAR-SO”, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>BSUIR, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>JSC “INTEGRAL” - “INTEGRAL” Holding Managing Company

New possibilities are opened towards original highly sensitive nondestructive testing method – laser photothermoacoustic microscopy (LPTAM), based on applied physical multigraded principles of faint signals excitation, registration and processing with posterior extraction of useful information concerning permanent connections internal structure with macro-, micro- and sub micro- resolution. On account of high sensitivity to a continuity violation of aforesaid permanent connections the most difficult problem of this method future commissioning lies in the fact of output data verification. Considering complication of measuring body sampling in the range of maximal sensitivity to the continuity violation this method verification was successfully carried out by the means of destructive inspections, intercomparison of alternative nondestructive methods and statistical comparison based on a correlation analysis.

### A. The specificity and reliability of this diagnostic multistage technique

In the course of inspection performed on microbonded connections (fig. 1) was caught essentially different sight of the resultant laser photoacoustic topograms (fig. 2, 3) of two extreme kinds: unsatisfactory (fig. 2) and satisfactory connection quality (fig. 3).

The laser photoacoustic topogram (fig. 3) was resulted at the highest possible gain factor authenticated by background noise what vindicate the specificity and reliability of this diagnostic multistage technique. Besides background noise and configuration of the microbonded wire connection one can see island regions of aluminum oxide shut in films coloured in turquoise.



Figure 1 – Typical exterior view of the ultrasonic microbonded wire connection

The similar LPTAM check experiment was conducted on the imperfection specially created in the soldering paste die assembly layer of semiconductor chip #4 of the semiconductor device in order to provide congruence relative to the perfect mounted concomitant semiconductor chip #3 (Fig. 4).

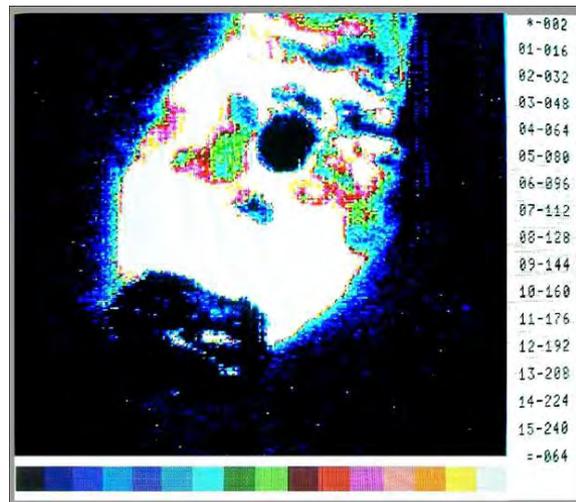


Figure 2 – Laser photoacoustic topograms of unsatisfactory connection quality (spatial X, Y resolution – 2.5  $\mu\text{m}$ )

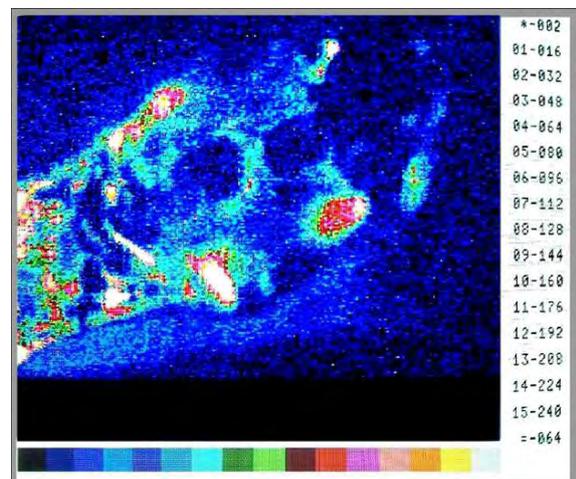


Figure 3 – Laser photoacoustic topograms of satisfactory (rotated) connection quality (spatial X, Y resolution – 2.5  $\mu\text{m}$ )

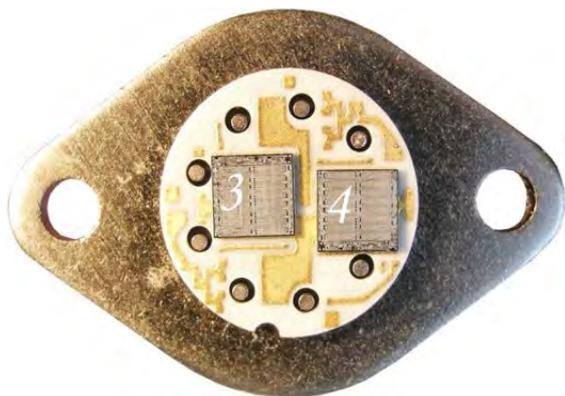


Figure 4 – Exterior view of the semiconductor device with perfect mounted semiconductor chip #3 and concomitant semiconductor chip #4 with the imperfection specially created in the soldering paste die assembly layer

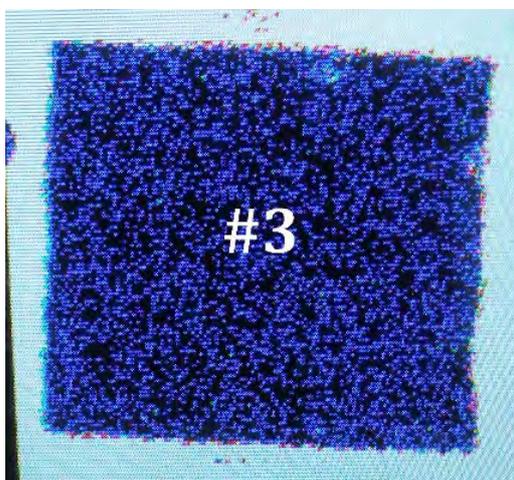


Figure 5 – Laser photoacoustic topograms resulted at the highest possible gain factor of perfect mounted semiconductor chip #3 and concomitant semiconductor chip #4 with the imperfection specially created in the soldering paste die assembly layer (spatial X, Y resolution – 50 μm)

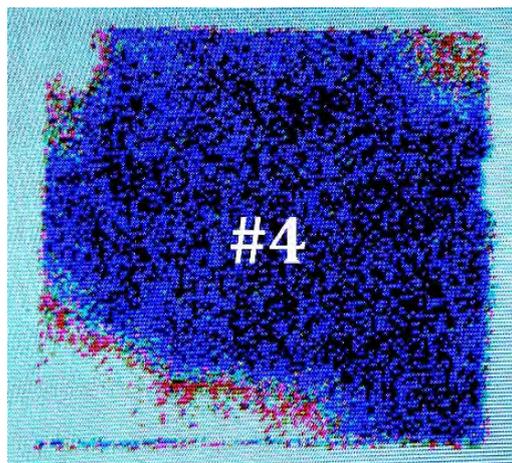


Figure 6 – Laser photoacoustic topograms resulted at the highest possible gain factor of concomitant semiconductor chip #4 with the imperfection specially created in the soldering paste die assembly layer (spatial X, Y resolution – 50 μm)

The laser photoacoustic topograms (fig. 5, 6) were resulted at the highest possible gain factor and show the perfect mounted semiconductor chip #3 equal to mounted semiconductor chip #3 shown on fig.4 what was improbable before previous experience by means of antiquated methods application such as eutectic and solder compositions. In order to provide experimental verification of the chip #3 perfect mounting the replicate chip #4 equal to mounted semiconductor chip #4 shown on fig. 4 was mounted with the imperfections in the soldering paste die assembly layer.

As an example of direct comparison the bonding die of semiconductor device using adhesive low-quality compositions are shown on fig. 7, 8.

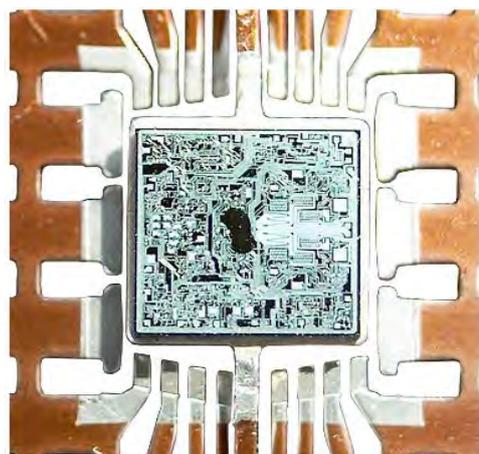


Figure 7 – Exterior view of the semiconductor device with low-quality adhesive mounted semiconductor chip

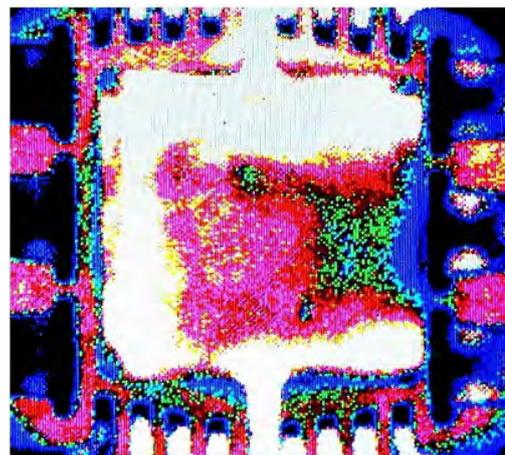


Figure 8 – Laser photoacoustic topogram of the semiconductor device with low-quality adhesive mounted semiconductor chip resulted at the low gain factor (spatial X, Y resolution – 50 μm)

The laser photoacoustic topogram (fig. 8) visualize low adhesion of glued joint “die - lead frame pad” almost on 90% of chip mounting surface area.

1. Волкенштейн С.С., Хмыль А.А. Неразрушающие методы контроля качества монтажа полупроводниковых кристаллов в корпуса ИМС «Технологии в электронной промышленности», №2, 2011 г., с. 18-22

УДК 621.382

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ РАЗОГРЕВА СВЕТОДИОДОВ Cree И REBEL ПРИ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКАХ

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Васьков О.С.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>1</sup>

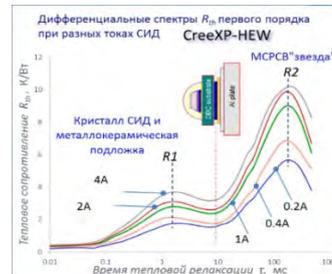
<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии (ТРДС) [1–3] с использованием релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов [4] исследованы тепловые параметры мощных светоизлучающих диодов (СИД) Cree XPE-HEW и Rebel ES белого свечения при импульсных токах выше предельно допустимых постоянных токах для данных СИД. Установлены особенности изменения сечения теплового потока в мощных светодиодах с разной площадью кристалла и конфигурацией. Для высоких плотностей тока (>200 А/см<sup>2</sup>) при измерениях методом ТРДС в режиме быстрого разогрева (<1 с), исключающего тепловой пробой СИД, наблюдался рост слоевого теплового сопротивления  $R_{th}$  СИД Cree и Rebel, связанный с наличием областей локального перегрева (неоднородностями распределения активного сопротивления по кристаллу СИД). Изменение теплового сопротивления  $R_{th}$  для Cree XPE-HEW при токах до 1 А в основном связано падением энергетического эффективности СИД и проявляется во всем временном диапазоне измерений (рисунок 1а). Вместе с тем, при импульсных токах выше предельно допустимых постоянных (для Cree выше 1 А) наблюдается существенное возрастание (>150%) уровня внутреннего теплового сопротивления “кристалл – корпус”  $R_{jc}$  СИД (пик  $R1$ ) по отношению к внешнему тепловому сопротивлению “корпус – окружающая среда”  $R_{ca}$  (пик  $R2$ ), что связано со шнурованием тока, т.е. ростом “горячих точек” в образце, связанных с неоднородностью стехиометрии состава InGaN кристалла СИД по площади (рисунок 1 б) и, следовательно, приводящих к неоднородному растеканию тока.

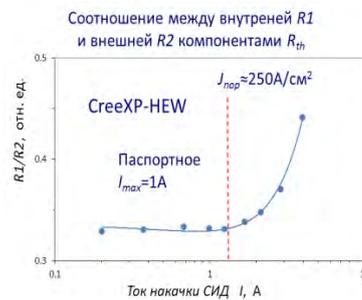
Для повышения точности при определении величины полного теплового сопротивления  $R_{th}$  при больших токах, вызывающих сильный нагрев СИД, используя импульсные вольтамперные характеристики (ВАХ), представленные на рисунке 2а, определена зависимость температурного коэффициента напряжения (ТКН) от температуры СИД (рисунок 2б). ТКН используется для пересчета изменений прямого напряжения на СИД в температуру его активной области СИД. Также проведен учет падения напряжения на последовательном сопротивлении СИД при больших токах. Различное поведение ТКН с температурой для СИД Cree XPE-HEW и Rebel ES вероятно связано с их различной конструкцией.

Рост теплового сопротивления CreeXP-HEW при увеличении рабочих токов СИД наблюдался

также при измерениях альтернативным методом, используемым при работе теплового тестера T3Ster (рисунок 3) [5, 6].

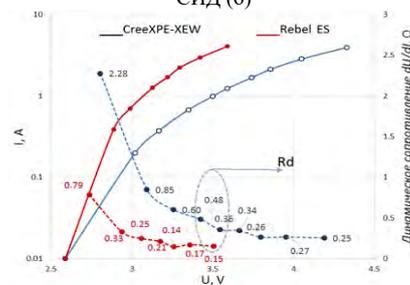


(а)

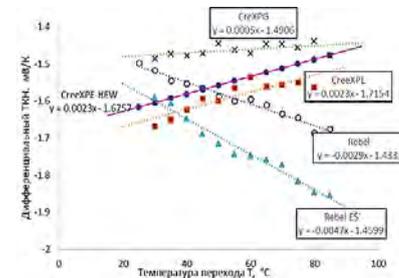


(б)

Рисунок 1 – Дифференциальные спектры ТРДС первого порядка теплового сопротивления СИД Cree XPE-HEW в диапазоне сильных токов (а), рост неоднородности распределения слоевого  $R_{th}$  при больших плотностях тока СИД (б)



(а)



(б)

Рисунок 2 – Импульсная ВАХ, измеренная при длительности импульса 2 мкс, (а) и температурная зависимость ТКН СИД Cree XPE-HEW и Rebel ES (б)

Таким образом, неоднородности разогрева светодиодов Cree и Rebel при импульсных токах выше предельно допустимых постоянных токов

увеличивают тепловое сопротивление данных СИД вследствие сужения путей теплового потока при отводе тепла от кристалла в окружающую среду.

Отсюда следует, что метод ТРДС при использовании коротких импульсов токов через СИД выше предельных, но не вызывающих теплового пробоя, может применяться для выявления и оценки степени неоднородности СИД, а также для исследования процессов их деградации, т.е. для обнаружения потенциально ненадежных СИД.

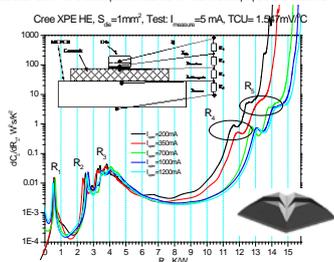


Рисунок 3 – Структурная функция СИД Cree XPE-NEW при разных токах, полученная при измерениях тепловым тестером T3Ster

1. Bumai, Yu.A. Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes / Yu.A. Bumai, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko // Metrology and Measurement Systems. – 2010. – Vol. 17, No. 1. – P. 39–46.
2. Zakgeim, A.L. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A.L. Zakgeim [et al.] // EuroSimE 2013: 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. – Wroclaw, 2013. – P. 1/7–7/7.
3. Васьков, О.С. Метод тепловой релаксационной спектроскопии и определение параметров светодиодов / О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В.С. Нисс // Докл. БГУИР. – 2011. – № 4. – С. 74–79.
4. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай [и др.] // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.
5. Transient dual interface test method for the measurement of -the thermal resistance junction-to-case of semiconductor devices / JEDEC Standard JESD51-14, www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14\_1.pdf (November 2010).
6. Implementation of the electrical test method for the measurement of the real thermal resistance and impedance of light-emitting diodes with exposed cooling surface / JEDEC Standard JESD51-51, www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD 51-51.pdf (April 2012).

УДК 621.315.592

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО НАГРЕВА ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ И КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Гацкевич Е.И.<sup>1</sup>, Ивлев Г.Д.<sup>2</sup>, Гундина М.А.<sup>1</sup>, Князев М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Одна из актуальных проблем полупроводниковой оптоэлектроники - создание эффективных источников света на основе германия, излучающих при комнатной температуре в ближней инфракрасной области ( $\lambda = 1,5-1,6$  мкм). В частности, на основе гетероструктур Ge/Si были получены светоизлучающие диоды [1] и лазерная генерация при оптической и электрической накачке [2]. Однако эффективность таких структур пока остается сравнительно низкой, а методы их создания (например, сверхвысоковакуумная молекулярно-лучевая эпитаксия) усложняют кремниевую технологию. Требуется поиск альтернативных методов создания и модифицирования Ge/Si гетероструктур, совместимых с кремниевой планарной технологией.

Недавно, было показано [3], что эффективным методом модификации гетероструктур Ge/полупроводник может быть импульсная лазерная обработка. В частности, в указанной работе экспериментально изучены процессы, происходящие в тонкопленочном германии при воздействии моноимпульсного излучения рубинового лазера на аморфные пленки Ge на различных подложках.

В настоящей работе проведено моделирование лазерно-индуцированного нагрева в тонкопленочном Ge на кремниевых и кварцевых подложках при облучении наносекундными импульсами

рубинового лазера. Поскольку температура плавления  $T_m$  аморфной пленки Ge (965 K) существенно ниже температур плавления кремниевой (1687 K) и кварцевой подложки (2000 K) моделирование проводилось для режимов лазерного воздействия, когда плавится только пленка Ge. Исследовались образцы с тонкопленочным Ge толщиной от 100 до 300 нм.

Моделирование нагрева проводилось на основе численного решения задачи Стефана для экспериментальной ситуации [3]. То есть, рассматривалось воздействие импульсов излучения рубинового лазера длительностью 80 нс. Согласно условиям эксперимента временная форма импульса соответствовала Гауссовскому профилю, интенсивность лазерного излучения равномерно распределялась по облучаемой зоне. Условия эксперимента позволяют ограничиться одномерным приближением.

В этой постановке задачи нелинейное неоднородное уравнение теплопроводности с условием Стефана на границе фазового перехода имеет вид

$$\rho(x, T) \left( c(x, T) + L \delta(T - T_m) \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(x, t), \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

$$T|_{x=D} = T|_{t=0} = T_0,$$

где  $T$  – температура,  $T_0 = 300$  К, координата  $x$  направлена вглубь образца,  $\rho$  – плотность,  $c$  – удельная теплоемкость,  $k$  – теплопроводность,  $L$  – скрытая теплота плавления,  $T_m$  – температура плавления,  $\delta(T)$  – дельта функция Дирака. Функция  $Q(x,t)$  описывает выделение тепла при поглощении лазерного излучения:

$$Q(x,t) = \alpha(T)(1-R)q(t) \exp\left\{-\int_0^x \alpha(T(x')) dx'\right\}, \quad (2)$$

здесь  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $R$  – коэффициент отражения,  $q(t)$  – форма лазерного импульса.

В расчете учитывались температурные зависимости оптических и теплофизических параметров слоёв. Уравнение теплопроводности решалось в конечных разностях методом прогонки по неявной разностной схеме.

Из расчётных данных по зависимости максимальной температуры  $T_{max}$  поверхности аморфной плёнки от плотности энергии облучения  $E$  следует (рис.1), что для обеих систем эта зависимость является линейной и линейность нарушается только вблизи достижения температуры плавления, что обусловлено поглощением энергии в результате фазового перехода аморфный Ge – расплав (скрытая теплота плавления а-Ge равна  $336 \text{ J/cm}^2$ ). Заметим, что с ростом толщины плёнки нужны меньшие плотности энергии облучения для достижения температуры плавления на поверхности системы, что связано с низким коэффициентом теплопроводности аморфного Ge (согласно справочным данным коэффициент теплопроводности а-Ge равен  $0.01 \text{ W/(cm}\cdot\text{K)}$ , что существенно меньше коэффициента теплопроводности кристаллического Si ( $1.2 \text{ W/(cm}\cdot\text{K)}$  при  $300 \text{ K}$ )). Коэффициент теплопроводности  $\text{SiO}_2$  ( $0.012 \text{ W/(cm}\cdot\text{K)}$ ) также ниже, чем у Si, что приводит к тому, что на кварцевых подложках температура плавления на поверхности достигается при ещё более низких плотностях энергии облучения.

Зависимость плотности энергии  $E_{th}$ , при которой на поверхности достигается температура плавления, от толщины плёнки (рис.2) хорошо аппроксимируется функциями  $E_{th}(h) = 0.096 + 0.864 \exp(-h/55.8)$  для кремниевой подложки и  $E_{th}(h) = 0.08 + 0.08 \exp(-h/144.27)$  для кварцевой подложки.

На рисунке 3 приведено распределение температуры по глубине в системах с Si подложкой в момент достижения температуры плавления при  $E_{th}$  для данной толщины плёнки. Видно, что градиент температуры в плёнке возрастает с уменьшением её толщины. Основная

часть энергии лазерного импульса в этот момент сосредоточена в пленки Ge.

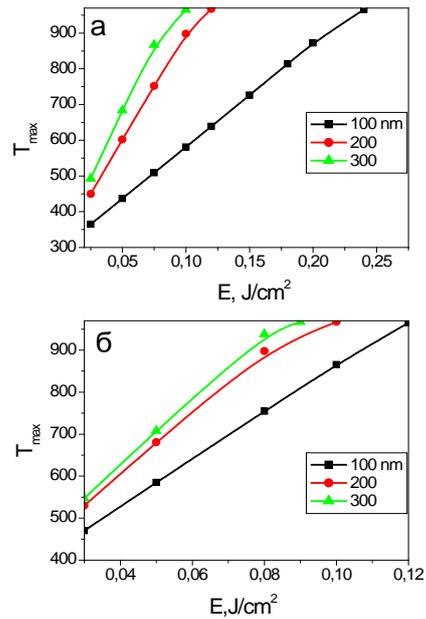


Рисунок 1 – Зависимость максимальной температуры поверхности систем а-Ge/Si (а) и а-Ge/SiO<sub>2</sub> (б) от плотности энергии облучения для указанных толщин тонкоплёночного Ge

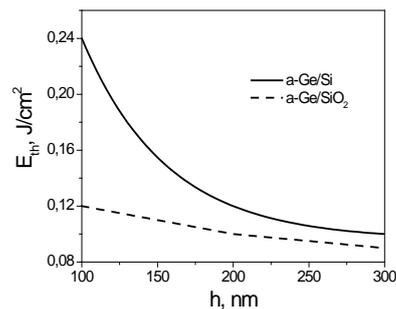


Рисунок 2 – Зависимость пороговой плотности энергии (достижение температуры плавления) от толщины плёнки для указанных типов подложки

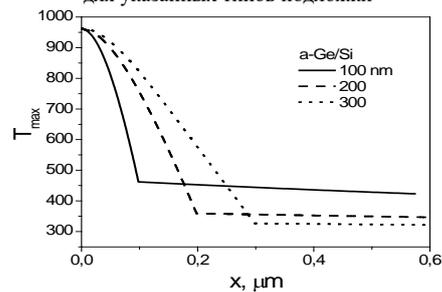


Рисунок 3 – Распределение температуры по глубине в момент достижения температуры плавления на поверхности для указанных толщин тонкоплёночного Ge в системе а-Ge/Si

Таким образом, в настоящей работе проведено моделирование лазерно-индуцированного нагрева тонкоплёночного Ge на кремниевых и кварцевых подложках. Установлено, что при одних и тех же плотностях энергии облучения температура поверхности возрастает с увеличением толщины плёнки как для системы а-Ge/Si,

так и для a-Ge/SiO<sub>2</sub>, что обусловлено низким коэффициентом теплопроводности аморфного Ge. Зависимость пороговой плотности энергии, необходимой для достижения температуры плавления в плёнке, от толщины плёнки хорошо описывается экспоненциальным законом ослабления. Показано, что градиент температуры в тонкоплёночном Ge в системе a-Ge/Si возрастает с уменьшением толщины пленки.

УДК 621.315.592

## ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Гацкевич Е.И., Альхимович М.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Системы плёнка Ge на кремниевых подложках широко изучаются как перспективные системы для использования в оптоэлектронике при разработке светоизлучающих приборов [1]. Такие структуры можно получить методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако этот метод довольно дорогой и плохо совместим с кремниевой технологией. Для практических применений Ge/Si структуры можно формировать методом ионно-лучевого распыления мишени в вакууме [2]. При использовании этого метода структуры получаются несовершенными и для улучшения их свойств используют термическую обработку. Недавно выполнены работы [2, 3], в которых показана эффективность использования для этих целей лазерного отжига. В частности в работе [3] экспериментально изучены лазерно-индуцированные процессы при воздействии моноимпульсного (70–80 нс) излучения рубинового лазера на аморфные пленки Ge на кремниевых подложках. При анализе лазерноиндуцированных процессов в указанной работе использовался метод оптического зондирования. Для правильной интерпретации результатов оптического зондирования важно иметь данные о зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения как от толщины пленки, так и от угла падения. Кроме того для определения оптимальных режимов лазерного воздействия также важным является знание оптических свойств отжигаемых систем.

В настоящей работе проведено моделирование отражательной способности аморфного германия (a-Ge) на подложке монокристаллического кремния (Si). Рассматривались структуры, в которых толщина плёнки сравнима с длиной волны оптического излучения, а толщина подложки существенно её превышает.

Для определения отражательной способности  $R$  воспользуемся теорией распространения электромагнитных волн в слоистой среде [4]. Коэффициент отражения от такой среды определяется показателем преломления  $n$

1. Kaschel, M. Room-temperature electroluminescence from tensile strained double-heterojunction germanium pin LEDs on silicon substrates / M. Kaschel [et al.] // Solid-State Electron. -2013. – V.83. – P. 87–91.
2. Liu, J. Ge-on-Si laser operating at room temperature / J. Liu [et al.] // Optics Lett. - 2010. – Vol.35. – P. 679.
3. Фотолуминесценция лазерно-модифицированных слоёв GeSi/Si // Г.Д. Ивлев [и др.]/Сборник докладов Международной научной конференции ФТТ-2016 «Актуальные проблемы физики твердого тела» 22-25 ноября 2016 г. - Минск, «Ковчег», 2016. - Т.2. - С. 81 – 83.

(комплексным показателем преломления  $\tilde{n} = n + ik$  для проводящей среды).

Пусть оптическое излучение падает под углом  $\theta_0$  из воздушной среды ( $n_0 = 1$ ). Для плоскополяризованной волны коэффициент отражения

$$R = \frac{R_{TE} + R_{TM}}{2}, \quad (1)$$

где индексы “TE” и “TM” соответствуют поперечной электрической и поперечной магнитной волнам, причем

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2, \quad R_{TM} = |r_{TM}|^2. \quad (2)$$

Величины  $r_{TE}$  и  $r_{TM}$  определяются через характеристические матрицы  $M_{TE}$  и  $B_{TM}$  следующим образом:

$$r_{TE} = \frac{(m_{11} + m_{21}p_e)p_0 - (m_{21} + m_{22}p_e)}{(m_{11} + m_{12}p_e)p_0 + (m_{21} + m_{22}p_e)}, \quad (3)$$

$$r_{TM} = \frac{(b_{11} + b_{21}q_e)q_0 - (b_{21} + b_{22}q_e)}{(b_{11} + b_{12}q_e)q_0 + (b_{21} + b_{22}q_e)}, \quad (4)$$

где индексы “ $0$ ” и “ $e$ ” обозначают, соответственно, параметры воздуха и кремниевой подложки,  $p_0 = q_0 = \cos \theta_0$ ,  $p_e = \tilde{n}_e \cos \theta_e$ ,  $q_e = \cos \theta_e / \tilde{n}_e$ , угол определяется из обобщенного закона преломления  $n_0 \sin \theta_0 = \tilde{n}_e \sin \theta_e$ ,  $m_{ij}$  и  $b_{ij}$  - элементы характеристических матриц.

Характеристические матрицы для аморфного слоя определяются формулами:

$$M_{TE} = \begin{bmatrix} \cos(\beta h) & \frac{-i}{p} \sin(\beta h) \\ -ip \sin(\beta h) & \cos(\beta h) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$B_{TM} = \begin{bmatrix} \cos(\beta h) & \frac{-i}{q} \sin(\beta h) \\ -iq \sin(\beta h) & \cos(\beta h) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $h$  - толщина плёнки,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  - длина волны падающего излучения,  $\beta = k_0 \tilde{n}_f \cos \theta_f$ ,  $\tilde{n}_f$  - показатель преломления аморфной плёнки, комплексный угол  $\theta_f$  вычисляется из обобщенного закона преломления,  $p = \tilde{n}_f \cos \theta_f$ ,  $q = \cos \theta_f / \tilde{n}_f$ .

Исследована отражательная способность системы a-Ge/Si на двух длинах волн 694 и 532 нм, которые являются длинами волн излучения рубинового и Nd:YAG лазеров, соответственно. Именно для этих типов лазеров проводились исследования в [2, 3]. Вычисления проводились для параметров плёнки и подложки, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 – Оптические параметры системы плёнка аморфного германия на кремнии

Материал	n	k
694 нм		
a-Ge	5,3	1,4
Si	3,76	0,015
532 нм		
a-Ge	4,7	2,2
Si	4,2	0,05

При нормальном падении ( $\theta_0 = 0$ ) составляющие коэффициента отражения для поперечной электрической и поперечной магнитной волн равны между собой и равны  $R$  (рис.1). Наиболее значительные изменения величины отражательной способности с изменением толщины плёнки имеют место при толщинах аморфной плёнки менее 200 нм, причём эти изменения более выражены на длине волны 694 нм. Максимальный разброс значений составляет 14% для длины волны 532 нм и почти 20% для 694 нм. То есть, при определении оптимальных режимов лазерного воздействия необходимо учитывать зависимость отражательной способности от толщины пленки.

Увеличение угла падения не приводит к существенному изменению отражательной способности для обеих длин волн (рис. 2).

В настоящей работе исследована отражательная способность системы a-Ge/Si на двух длинах волн 694 и 532 нм. Анализ зависимости отражательной способности от толщины пленки и угла падения показал, что при моделировании лазерно-индуцированных процессов в системах a-Ge/Si необходимо учитывать зависимость отражательной способности от толщины плёнки при толщинах аморфного Ge менее 200 нм для обеих длин волн.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования лазерно-индуцированных процессов при лазерном отжиге тонкопленочных систем на полупроводниковых подложках, а также при интерпретации результатов оптического зондирования.

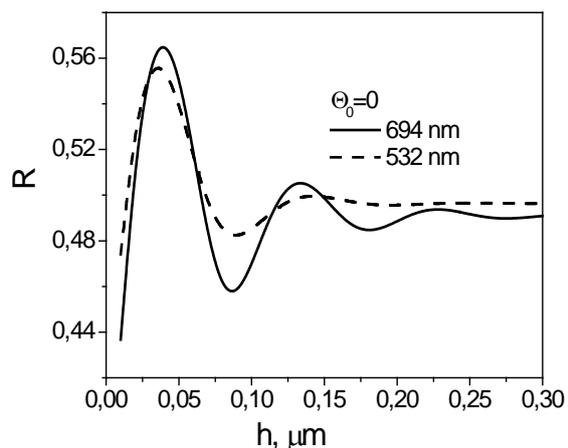


Рисунок 1 – Зависимость отражательной способности системы a-Ge/Si от толщины пленки при нормальном падении для указанных длин волн

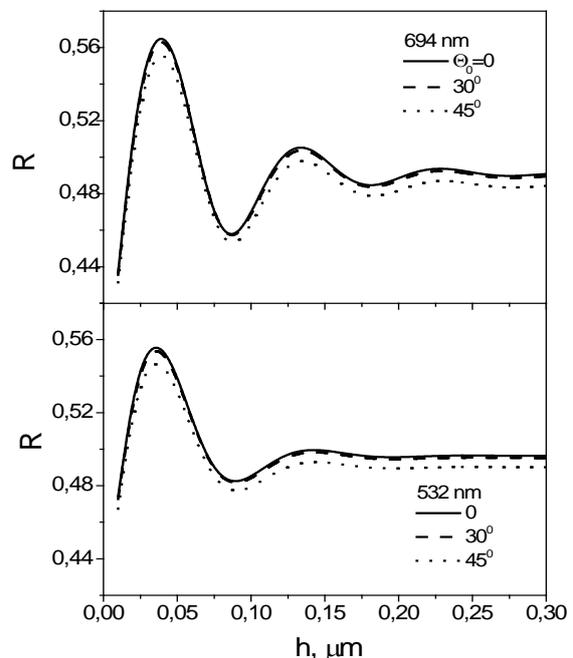


Рисунок 2 - Зависимость отражательной способности системы a-Ge/Si от толщины пленки при различных углах падения для указанных длин волн

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту Ф16Р-069.

1. Kaschel, M. Room-temperature electroluminescence from tensile strained double-heterojunction germanium pin LEDs on silicon substrates / M. Kaschel [et al.] // Solid-State Electron. -2013. – V.83. – P. 87–91.
2. Новиков, Г.А. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких плёнках германия на кремнии, сапфире и кварце / Г.А. Новиков [и др.] // ЖТФ.-2015.-Т.85, В.3.-С.89-95.
3. Новиков, Г.А. Импульсная модификация плёнок германия на подложках кремния, сапфира и кварца: структура и оптические свойства / Г.А. Новиков [и др.] // ФТП.-2015.- Т.49, В.6.-С.746-752.
4. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф.- М.: Наука, 1970. -856 с.

**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА  $\text{Sm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$**

Дернович О.П.<sup>1</sup>, Демеш М.П.<sup>1</sup>, Гусакова Н.В.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>  
Павлюк А.А.<sup>2</sup>, Корниенко А.А.<sup>3</sup>, Дунина Е.Б.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИИ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт неорганической химии имени А.В. Николаева Сибирского  
отделения РАН, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

Кристаллы, легированные ионами  $\text{Sm}^{3+}$ , являются перспективными материалами для создания твердотельных лазеров видимого спектрального диапазона без необходимости использования нелинейного преобразования частоты [1].

На данный момент проведены исследования некоторых спектроскопических свойств ряда легированных ионами самария монокристаллов:  $\text{Sm}^{3+}:\text{Y}_3\text{A}_5\text{O}_{12}$  [2],  $\text{Sm}^{3+}:\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  [3],  $\text{Sm}^{3+}:\text{K}_2\text{YF}_5$  [4],  $\text{Sm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  [5],  $\text{Sm}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ ,  $\text{Sm}^{3+}:\text{SrAl}_2\text{O}_9$  [6], фосфатных, фторфосфатных и боратных стекол [7,8].

В этой работе представлены спектроскопические свойства ионов  $\text{Sm}^{3+}$  в кристалле калий-иттриевого вольфрамата  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  (KYW). Кристалл  $\text{Sm}:\text{KYW}$  был выращен по модифицированному методу Чохральского в условиях низкотемпературного градиента из раствора-расплава в платиновом тигле с использованием соединения  $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$  в качестве растворителя. Были получены монокристаллы  $\text{Sm}:\text{KYW}$  с содержанием ионов  $\text{Sm}^{3+}$  2,1 ат.%. Для спектроскопических исследований были вырезаны относительно осей  $N_m$ ,  $N_p$  и  $N_g$  и отполированы несколько экспериментальных образцов.

Измерение спектров поглощения кристалла производилось на двулучевом спектрофотометре Cary 5000 Varian при комнатной температуре в спектральном диапазоне 330–1700 нм. Вследствие анизотропии оптических свойств кристалла KYW, спектры поглощения регистрировались в поляризованном свете с направлением поляризации вдоль осей оптических индикатрис  $N_m$ ,  $N_p$ ,  $N_g$ .

Расчет поперечных сечений поглощения ионов самария в кристалле производился по формуле:

$$\sigma_{abs}(\lambda) = \frac{k(\lambda)}{N_{Sm}}$$

где  $k(\lambda)$  – коэффициент поглощения,  $N_{Sm}=1,37 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  – концентрация ионов  $\text{Sm}^{3+}$ .

Полученные спектры поперечного сечения поглощения кристалла  $\text{Sm}:\text{KYW}$  в спектральной области 340–600 нм для трех поляризаций приведены на рисунке 1.

Максимальное значение поперечного сечения поглощения составило  $7,7 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  на длине

волны 404,6 нм, соответствующей переходам  ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{P}_{3/2, 5/2}$ , для  $E||N_m$  поляризации.

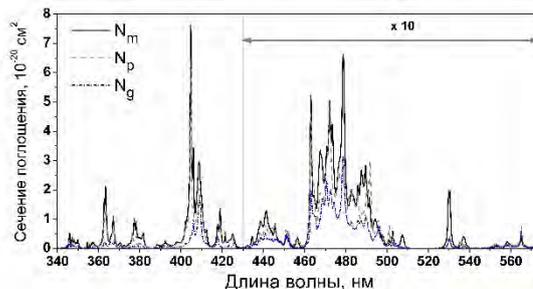


Рисунок 1 – Спектры поперечных сечений поглощения кристалла  $\text{Sm}^{3+}:\text{KYW}$  в поляризованном свете

Знание спектров поглощения позволяет в рамках модифицированного метода Джадда-Офельта [9] рассчитать радиационное время жизни  $\tau_{rad}$  уровня  ${}^4\text{G}_{5/2}$  и коэффициенты ветвления люминесценции  $\beta_{calc}$ , определяющие вероятность спонтанного перехода возбужденных частиц на определенный уровень с испусканием излучения. Вычисленные значения представлены в табл. 1.

Спектры люминесценции при возбуждении лазерным диодом на длине волны 405 нм регистрировались в поляризованном свете в видимом спектральном диапазоне 550–730 нм, что соответствует переходам с энергетического уровня  ${}^4\text{G}_{5/2}$  на уровни  ${}^6\text{H}_{5/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{7/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{9/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{11/2}$ . С помощью спектров, которые предварительно были скорректированы с учетом спектральной чувствительности экспериментальной установки, были рассчитаны экспериментальные коэффициенты ветвления люминесценции  $\beta_{meas}$  с возбужденного состояния  ${}^4\text{G}_{5/2}$  по формуле

$$\beta_{J,J'} = \frac{\int \lambda I_{J,J'}(\lambda) d\lambda}{\sum_J \int \lambda I_{J,J'}(\lambda) d\lambda}$$

где  $I_{J,J'}(\lambda)$  – мощность люминесценции в относительных единицах.

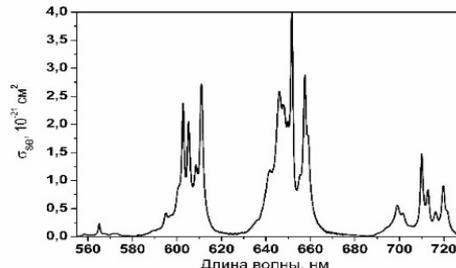


Рисунок 2 – Спектр вынужденного излучения кристалла  $\text{Sm}^{3+}:\text{KYW}$  (поляризация  $E||N_m$ )

Методом Фюхтбауэра-Ладенбурга на основании спектров люминесценции, кроме того, были рассчитаны сечения стимулированного испускания  $\sigma_{se}$ . Наибольшей интенсивностью характеризовался спектр для излучения, поляризованного вдоль оси  $N_m$ , приведенный на рисунке 2. Пиковые значения поперечных сечений для четырех переходов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры переходов с уровня  ${}^4G_{5/2}$  кристалла  $Sm^{3+}:KYW$ : 1 – переход, 2 – спектральный диапазон, нм; 3 – рассчитанный коэффициент ветвления люминесценции  $\beta_{calc}$ ; 4 – экспериментально полученный коэффициент ветвления люминесценции  $\beta_{meas}$ ; 5 – сечение стимулированного испускания  $\sigma_{se}$ ,  $10^{-21}$  см<sup>2</sup>; 6 – радиационное время жизни  $\tau_{rad}$ , мкс

1	2	3	4	5	6
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{5/2}$	550-582	0.033	0.0873	0.25	950
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$	585-625	0.295	0.3534	2.7	
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$	625-680	0.4568	0.4934	4	
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$	685-730	0.08	0.0659	1.47	

С целью изучения динамики возбужденного состояния  ${}^4G_{5/2}$  проводились кинетические люминесцентные измерения. Возбуждение люминесценции осуществлялось в области 480 нм на высоколежащие энергетические уровни  ${}^4F_{5/2}+{}^4I_{13/2}$  с последующей быстрой безызлучательной релаксацией на исследуемый уровень  ${}^4G_{5/2}$ . Сигнал люминесценции был зарегистрирован на длинах волн 607, 647 и 712 нм. Во всех случаях сигнал люминесценции не имел участка разгорания, а затухание происходило по моноэкспоненциальному закону (рис.3). Измеренное время жизни уровня  ${}^4G_{5/2}$  иона  $Sm^{3+}$  составило 600 мкс.

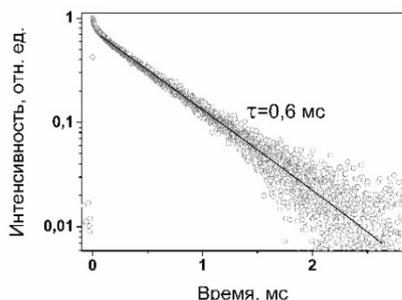


Рисунок 3 – Кинетика затухания люминесценции с уровня  ${}^4G_{5/2}$  в кристалле  $Sm^{3+}:KYW$

УДК 681

### Er,Yb:Ca<sub>3</sub>Re<sub>2</sub>(VO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (Re=Y, Gd) – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ, ИЗЛУЧАЮЩИХ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,5–1,6 мкм

Дейнека Р.В.<sup>1</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Шеховцов А.Н.<sup>2</sup>, Космына М.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт монокристаллов НАН Украины, Харьков, Украина

Лазерное излучение спектральной области 1,5–1,6 мкм благодаря ряду преимуществ получило широкое практическое применение в лазерной дальнометрии, системах оптической локации,

Квантовый выход люминесценции, определяемый как отношение измеренного времени жизни возбужденного уровня в кристалле к радиационному времени жизни этого уровня, рассчитанному по теории Джадда-Офельта, составил 63%.

Таким образом, определены спектры поперечного сечения поглощения и стимулированного испускания кристалла  $Sm^{3+}:KYW$  в поляризованном свете. Модифицированным методом Джадда-Офельта рассчитаны спектроскопические параметры материала. Радиационное время жизни уровня  ${}^4G_{5/2}$  составляет 950 мкс. Наиболее интенсивная полоса поглощения наблюдается на переходе  ${}^6H_{5/2} \rightarrow {}^6P_{3/2, 5/2}$  с пиковым значением сечения поглощения  $7,7 \times 10^{-20}$  см<sup>2</sup> для излучения, поляризованного вдоль оси оптической индикатрисы  $N_m$ . Максимальное сечение стимулированного испускания приходится на длину волны 652 нм и составляет  $4 \times 10^{21}$  см<sup>2</sup> для той же поляризации излучения.

1. Spectroscopy and laser operation of  $Sm^{3+}$ -doped lithium lutetium tetrafluoride ( $LiLuF_4$ ) and strontium hexaaluminate ( $SrAl_2O_9$ ) / D.-T. Marzahl [et. al.] // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, No.16. – P. 21118-21127.
2. Absorption spectra and energy levels of  $Sm^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$  / J.B. Gruber [et. al.] // Chemical Physics. – 1987. – Vol. 113. – P. 175-186.
3. Optical spectra and excited state relaxation dynamics of  $Sm^{3+}$  in  $Gd_2SiO_5$  single crystal / A. Strzep [et.al.] // Appl Phys B. – 2012. – Vol. 106, No. 1. – P. 85-93.
4. Judd–Ofelt analysis of spectroscopic properties of  $Sm^{3+}$  ions in  $K_2YF_5$  crystal / P. Van Do [et.al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – Vol. 520. – P. 262-265.
5. Pugh-Thomas, D. Spectroscopic properties and Judd–Ofelt analysis of  $BaY_2F_8:Sm^{3+}$  / D. Pugh-Thomas // Journal of the Optical Society of America B. – 2014. – Vol. 31, No. 8. – P. 1777-1785.
6. Spectroscopy and laser operation of  $Sm^{3+}$ -doped lithium lutetium tetrafluoride ( $LiLuF_4$ ) and strontium hexaaluminate ( $SrAl_2O_9$ ) / D.-T. Marzahl [et. al.] // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, No. 16. – P. 21118-21127.
7. Spectroscopic properties of  $Sm^{3+}$  ions in phosphate and fluorophosphate glasses / R. Vijaya [et.al.] // J. Non-Cryst. Sol. – 2013. – Vol. 365, No.1. – P. 85-92.
8. Judd–Ofelt parameters and radiative properties of  $Sm^{3+}$  ions doped zinc bismuth borate glasses / A. Agarwal [et.al.] // Optical Materials. – 2009. – Vol. 32, No. 2. – P. 339-344.
9. Dependence of the line strength of  $f-f$  transitions on the manifold energy. II. Analysis of  $Pr^{3+}$  in  $KPr_2O_7$  / A.A. Kornienko [et. al.] // Phys. Status Solidi A. – 1990. – Vol. 157. – P. 267-273.

медицине. Основным преимуществом данного излучения является сравнительная безопасность для глаз, эта особенность обусловлена высоким коэффициентом поглощения роговицы и хрусталика в

этой спектральной области, благодаря чему, чувствительной сетчатки достигает малая доля падающей энергии. Так же благодаря “окнам прозрачности” атмосферы в спектральном диапазоне 1,5–1,6 мкм, источники излучения данного диапазона используются в дистанционном зондировании Земли и в системах оптической локации.

Среди источников излучения спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм наибольшие распространение получили твердотельные лазеры на основе фосфатных стёкол с ионами Er и Yb, которые наиболее полно соответствуют следующим требованиям для получения эффективной лазерной генерации:

- эффективное поглощение излучения накачки ионами иттербия и последующий эффективный перенос энергии с ионов иттербия на ионы эрбия;
- быстрая безызлучательная релаксация с уровня  $^4I_{11/2}$  ионов эрбия на верхний лазерный уровень  $^4I_{13/2}$  для минимизации потерь, связанных с обратным переносом энергии от ионов иттербия к ионам эрбия и ап-конверсионными переходами на вышележащие уровни;
- высокий квантовый выход люминесценции с уровня  $^4I_{13/2}$  для сохранения невысокого порога лазерной генерации.

Однако основным недостатком использования фосфатных стекол в качестве лазерных сред является их низкая теплопроводность (0,85 Вт/м·К) и, как следствие, низкий порог теплового разрушения [1]. Поэтому поиск кристаллической матрицы с ионами эрбия и иттербия, удовлетворяющей спектроскопическим требованиям для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1,5–1,6 мкм и имеющей высокую теплопроводность является актуальной задачей.

Кристаллы  $\text{Er, Yb:Ca}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4(\text{CYB})$  и  $\text{Er, Yb:Ca}_3\text{Gd}_2(\text{BO}_3)_4(\text{CGB})$ , были выращены методом Чохральского в Институте монокристаллов НАН Украины. Из выращенных монокристаллов были изготовлены полированные образцы для дальнейших спектроскопических исследований.

Спектры поглощения кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$ , зарегистрированные при комнатной температуре в поляризованном свете на двухканальном спектрофотометре CARY-5000 в спектральном диапазоне 800–1100 нм представлены на рисунке 1.

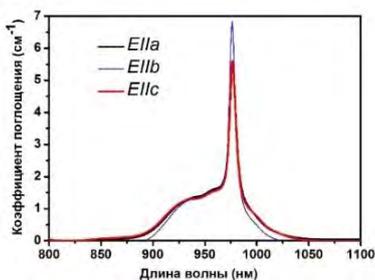


Рисунок 1 – Спектр поглощения кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в спектральной области 800–1100 нм в поляризованном свете

Спектры поглощения кристалла характеризуются широкой полосой в спектральном диапазоне

800–1100 нм с пиком на длине волны 976 нм. Максимальное значение коэффициента поглощения в пике составляет  $6,8 \text{ см}^{-1}$  для поляризации излучения  $E//b$ .

Спектры люминесценции кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в области 1,5 мкм (переход  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов эрбия) для разных направлений распространения излучения, измеренные при комнатной температуре, приведены на рисунке 2.

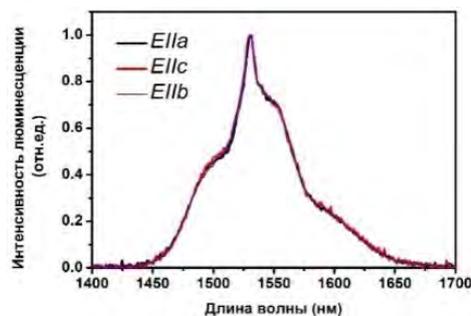


Рисунок 2 – Спектры люминесценции кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в области около 1,5 мкм в поляризованном свете

Спектры люминесценции характеризуются широкой полосой испускания в спектральной области 1400–1700 нм с пиком на длине волны 1531 нм.

Кинетические люминесцентные измерения в кристаллах  $\text{CYB}$  (рисунок 3) проводились с целью изучения динамики возбужденного состояния  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия. Затухание люминесценции в спектральной области 1,5–1,6 мкм имело моноэкспоненциальный характер.

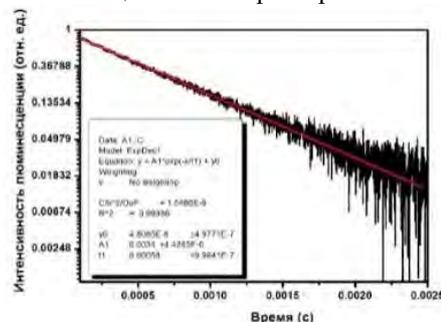


Рисунок 3 - Кинетика затухания люминесценции кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в области около 1,5 мкм

Обработка данных, полученных в ходе измерений, показала, что время жизни уровня  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле  $\text{CYB}$  составило  $580 \pm 5$  мкс. Радиационное время жизни уровня  $^4I_{13/2}$  иона эрбия для кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  известно из литературы и составляет 2,41 мс [2]. Таким образом, квантовый выход люминесценции с уровня  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  составил 24 %.

Для определения эффективностей переноса энергии от ионов иттербия на ионы эрбия в кристаллах  $\text{Er, Yb:Ca}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$  оценивалось время затухания люминесценции с уровня  $^2F_{5/2}$  ионов иттербия. Для уменьшения влияния перепоглощения, время жизни возбужденного уровня измерялось в суспензиях иммерсионных жидкостей. Эффективность переноса энергии от

ионов иттербия к ионам эрбия в кристалле Er,Yb:СУВ составила 59 %.

Спектр поглощения кристалла Er(0.25 мас.%),Yb(1.22 мас.%):СГВ, зарегистрированный в неполяризованном свете в спектральной области 850–1100 нм представлен на рисунке 4. Максимальное значение коэффициента поглощения в пике на длине волны 976 нм составило  $1,8 \text{ см}^{-1}$ .

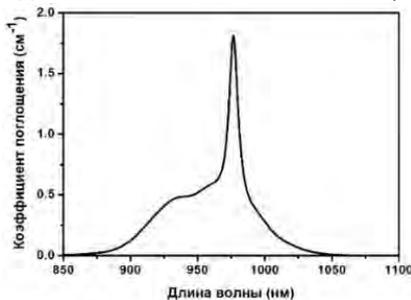


Рисунок 4 – Спектр поглощения кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 850-1100 нм

В спектре люминесценции наблюдается широкая полоса испускания с пиком на длине волны 1531 нм (рисунок 5).

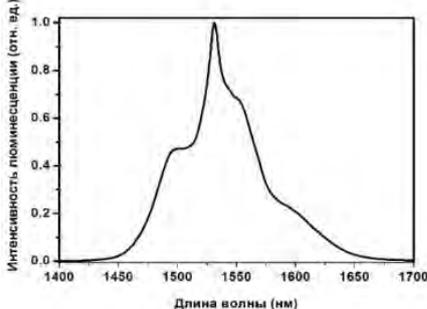


Рисунок 5 – Спектр люминесценции кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 1400-1700 нм

Затухание люминесценции в области около 1.5 мкм имело моноэкспоненциальный характер (рисунок 6). Время жизни уровня  ${}^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  составило  $550 \pm 5$  мкс.

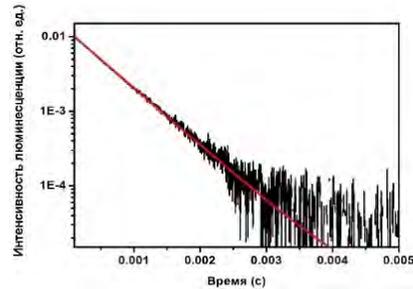


Рисунок 6 – Кинетика затухания люминесценции кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 1,5–1,6 мкм

Радиационное время жизни уровня  ${}^4I_{13/2}$  иона эрбия для кристалла Er,Yb:СГВ составляет 1,98 мс [2]. Квантовый выход люминесценции с уровня  ${}^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  составляет 27,8 %.

Таким образом, значения спектроскопических характеристик кристаллов Er,Yb:СУВ и Er,Yb:СГВ удовлетворяют требованиям, предъявляемым к лазерным эрбий-иттербиевым средам, для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Поэтому актуальной остается задача по изучению возможностей получения лазерной генерации и исследованию генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:СУВ и Er,Yb:СГВ.

1. 230-mW diode-pumped single-frequency Er,Yb laser at 1.5  $\mu\text{m}$  / S. Taccheo, G. Sorbello, P. Laporta, G. Karlsson, and F. Laurell // IEEE Photonics Technology Letters – 2001. – Vol. 13, № 1. – P.19-21.
2. Optical transition probability of  $\text{Er}^{3+}$  ions in  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped  $\text{Ca}_3\text{Ln}_2(\text{BO}_3)_4$  (Ln=Y, Gd, La) crystals / B. Wei, L.Z. Zhang, Z.B. Lin, and G.F. Wang // Materials Research Innovations. – 2007. – Vol. 11, № 3. – P. 154-157.

УДК 621.383.51

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Есман А.К., Потачиц В.А., Зыков Г.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время наилучшие характеристики обеспечиваются на тонкопленочных солнечных элементах (СЭ) –  $\alpha\text{-SiH}$ , CdS/CdTe и соединениях Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Наиболее перспективны, как по достигаемой эффективности, так и по надёжности и возможностям снижения себестоимости являются СЭ с активным слоем на основе поликристаллических пленок полупроводников Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (СIGS) [1-4].

Целью данной работы является поиск путей повышения эффективности преобразования солнечного излучения тонкопленочным СЭ на основе CuInSe<sub>2</sub> в электричество.

Структура предлагаемого нами тонкопленочного СЭ на основе CuInSe<sub>2</sub> приведена на рисунке 1 [5]. На полированной лицевой поверхности подложки 1,

изготовленной из нержавеющей стали, с закругленными краями последовательно расположены электрически соединенные: первый электродный слой 2, первый гетеропереход CuInSe<sub>2</sub> 3, второй электродный слой 4, второй гетеропереход CuInSe<sub>2</sub>-CdS 5-6, прозрачный электрод 7. Первый 3 и второй 5-6 гетеропереходы по функциональному назначению являются соответственно термоэлектрическим и фотоэлектрическим преобразователями. Геометрические размеры подложки 1 составляли 41×41×9 мм. Толщины электродных слоев 2 и 4 из молибдена (Mo) и слоев CuInSe<sub>2</sub> 3 и 5 были равны 1 мкм, а толщины слоя 6 из сульфида кадмия (CdS) и электрода 7 из оксида цинка (ZnO) – 50 нм. Длина и ширина слоев 2, 3 и 4

составляли соответственно 39×39 мм, а слоев 5 и 6 и электрода 7 – 38,7 × 38,7 мм.

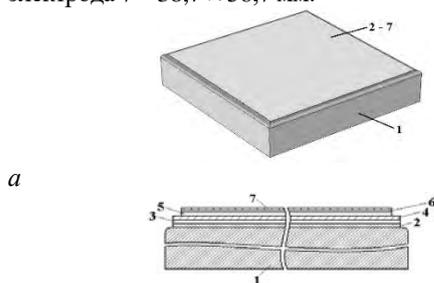


Рисунок 1 – Структура тонкопленочного солнечного элемента (а) и его сечение (б):

1 – подложка, 2 – первый электродный слой, 3 – первый гетеропереход CuInSe<sub>2</sub>, 4 – второй электродный слой, 5-6 – второй гетеропереход CuInSe<sub>2</sub>-CdS, 7 – прозрачный электрод

Прозрачный электрод 7 пропускает входное солнечное излучение, видимая часть которого поглощается во втором гетеропереходе CuInSe<sub>2</sub>-CdS 5-6, нагревая слой 6. Одна часть сгенерированных в слое 5 зарядов, достигших *p-n* перехода, разделяется его полем, в результате чего между прозрачным электродом 7 и вторым электродным слоем 4 создается фото-ЭДС. Другая часть фотогенерированных зарядов рекомбинирует. При этом нагревается слой 5 и за счет теплопередачи нагревается второй электродный слой 4. Инфракрасная часть входного солнечного излучения дополнительно нагревает этот слой. Боковые стороны подложки 1 теплоизолированы, а ее тыльная сторона поддерживается при постоянной температуре. Поэтому между первым 2 и вторым 4 электродными слоями образуется градиент температур, который вызывает появление термо-ЭДС между верхней и нижней сторонами первого гетероперехода CuInSe<sub>2</sub> 3, который является полупроводником с дырочным типом проводимости. В результате между первым электродным слоем 2, электрически соединенным с нижней стороной слоя 3, и прозрачным электродом 7 возникает сумма напряжений фото- и термо-ЭДС, являющаяся выходным электрическим источником постоянного тока. Возможность эффективного отвода тепла с металлической поверхности подложки с выступами 1 за счет увеличенной её площади, стабилизирует температуру тонкопленочного СЭ (второго слоя диселенида меди-индия 5), поддерживая его КПД в требуемом режиме, а инерционность остывания этого тонкопленочного СЭ стабилизирует выходное напряжение при переменной облачности.

Для моделирования использовалась программная платформа COMSOL Multiphysics - мощная интерактивная среда для решения большинства научных и инженерных задач, основанных на системе дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. С целью количественной

оценки повышения вырабатываемой электроэнергии предложенным тонкопленочным СЭ на основе CuInSe<sub>2</sub> использовался модуль «Теплопередача». Расчеты выполнялись для географических координат г. Минска с учетом суточного и сезонного изменения как температуры, так и мощности солнечного излучения спектра AM1,5, максимальное значение которой при использовании концентрации составляло 90 кВт/м<sup>2</sup>. В условиях, когда температура окружающей среды не превышает 0°C, тыльная сторона подложки 1 стабилизировалась при температуре 1 °С, в противном случае - при температуре 10 °С. Практически такая стабилизация может быть достигнута принудительным охлаждением тыльной стороны артезианской водопроводной водой.

Согласно полученным результатам максимальный градиент температуры ~ 3,1·10<sup>4</sup> К/м достигается на границе раздела первый электродный слой / первый гетеропереход CuInSe<sub>2</sub> сначала с юго-восточной стороны (около 12 часов дня), а затем - с юго-западной (спустя 2,5 часа). Для сравнения был рассчитан градиент температуры на гетеропереходе тонкопленочного СЭ CuInSe<sub>2</sub> с одним гетеропереходом. Численное значение данного градиента составило ~ 2,4·10<sup>3</sup> К/м, что в 12,5 раз меньше, чем на первом гетеропереходе тонкопленочного СЭ, состоящего из двух гетеропереходов. Профили градиентов температуры и температуры в электродных слоях и первом гетеропереходе CuInSe<sub>2</sub> для момента времени, когда градиент температуры на нижней границе раздела первого гетероперехода имеет максимальное значение, приведены на рисунке 2, где слой толщины от 0 до 1 мкм соответствует первому электродному слою, слой толщины от 1 до 2 мкм - первому гетеропереходу, слой толщины от 2 до 3 мкм - второму электродному слою.

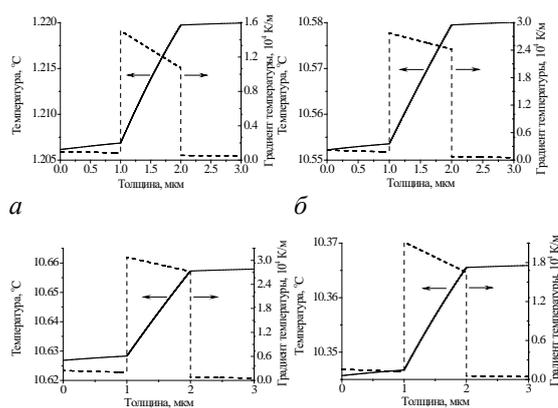


Рисунок 2 – Зависимости профиля температуры (сплошная линия) и градиента температуры (штриховая линия) в первом электродном слое (толщина 0-1 мкм), первом гетеропереходе CuInSe<sub>2</sub> (толщина 1-2 мкм) и втором электродном слое (толщина 2-3 мкм) в 13 (а, б) и 12 (в, г) часов дня с юго-восточной стороны в январе (а), апреле (б), июле (в) и октябре (г)

Градиенты температур на нижней и верхней границах раздела первого гетероперехода  $\text{CuInSe}_2$  отличаются примерно на  $0,35 \cdot 10^4$  К/м в апреле и июле (штриховая линия, рисунок 2, б и в) и на  $\sim 0,45 \cdot 10^4$  К/м в январе и октябре (штриховая линия, рисунок 2, а и з).

Учитывая значения термоЭДС гетероперехода [6] толщиной 3 мкм и то, что генерируемое им напряжение  $\sim 0,4$  мВ приводит к увеличению эффективности СЭ на 1 % при максимальной засветке и более 1 % при уменьшении солнечной радиации вследствие облачности и других причин. С другой стороны, введение второго гетероперехода изменяет температуру тонкопленочного солнечного элемента  $\text{CuInSe}_2$  при тех же условиях на  $0,5$  °С и несущественно влияет на эффективность последнего.

Таким образом, в предложенном тонкопленочном СЭ за счет использования теплоотвода через слой термоэлемента к подложке, тыльная сторона которой поддерживается при постоянной температуре, возможно увеличение эффективности преобразования солнечного излучения в электричество как минимум на 1 %. Проведенное моделирование показывает, что использование тандема

“СЭ – термоэлемент” на основе  $\text{CuInSe}_2$  при концентрации солнечного излучения (с охлаждением тыльной стороны) не только в разы повышает выходную мощность за счет стабилизации температуры, а значит – КПД, но и позволяет увеличить эффективность работы всего тандема. Моделирование проводилось для неподвижного устройства без механического слежения за Солнцем.

1. Новиков, Г.Ф. Солнечные преобразователи третьего поколения на основе Cu-In-Ga-(S, Se) / Г.Ф. Новиков, М.В. Гапанович // УФН. – 2017. – Т. 187, № 2. – С. 173–191.
2. Easily realizable heterojunction CdS/CuInSe<sub>2</sub> thin films photovoltaic application / A. Mandjoub [et al.] // Chalcogenide Letters. – 2015. – Vol. 12, no. 2. – P. 59–66.
3. Infiltrated photonic crystals for light-trapping in CuInSe<sub>2</sub> nanocrystal-based solar cells / S. Dottermusch [et al.] // Optics express. – 2017. – Vol. 25, no. 12. – P. A502–A514.
4. Davis, M.W. Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures / M.W. Davis, A.H. Fanney, B.P. Dougherty // J. Sol. Energy Eng. – 2001. – Vol. 123, 200–210 (2001).
5. Пат. РБ № 20481 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков, В.Б. Залеский, Т.Р. Леонова // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 5. – С. 120.
6. Магомедов, М.-П.А. Термоэлектрические и фотоэлектрические свойства р-п-гетероструктур  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ , полученных методом квазиравновесного осаждения / М.-П.А. Магомедов, Ш.М. Исмаилов, Дж.Х. Магомедова, П.П. Хохлачев // ФТП. – 2000. – Т. 34, вып. 6. – С. 689–691.

УДК 621.317

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ БИЕНИЯ ВАЛА ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Зайцев Е.А.<sup>1</sup>, Сидорчук В.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт электродинамики НАН Украины

<sup>2</sup> Киевский национальный торгово-экономический университет  
Киев, Украина

Во время работы и при плановых осмотрах турбо- и гидрогенераторов возникает необходимость в контроле биений боковых цилиндрических поверхностей валов ротора в нескольких контрольных сечениях по длине вала. Полученные данные используются при балансировке вала, минимизации динамического дисбаланса обусловленного технологическими погрешностями при изготовлении и сборке, повреждениями, осевыми деформациями вала, которые возникают при эксплуатации, например при износе подшипников [1]. При этом как указано в [2], использование датчиков вибрации корпуса неэффективно для мониторинга машин в которых вибрация, производимая движением или положением вала, значительно гасится масляной пленкой подшипника. В связи с чем возникает необходимость в непосредственном контроле параметров биений валов.

Таким образом, создание датчиков для подсистем контроля биения валов турбо- и гидрогенераторов является актуальной научно-технической проблемой обеспечения безопасной и бесперебойной работы гидрогенераторов.

Классическим методом контроля биения является применение механических индикаторов [1]. Для минимизации воздействия на объект со стороны измерительного оборудования измерения проводят бесконтактными способами.

Наиболее известной подсистемой бесконтактной системой вибрационного контроля является VibraWatch - Vibration Monitoring System [3], разработанная как часть универсального контрольно-диагностического комплекса ZOOM [4] компанией VibroSystM Inc. (Канада). Для измерения вибраций в данной системе используется ёмкостной датчик PCS-102, преимуществами которого является низкая стоимость, простота конструкции и высокая точность измерения. Но при этом ему присущи и недостатки, связанные с диэлектрическими свойствами среды эксплуатации. Последнего недостатка лишены оптические датчики.

Наибольшее распространение получили оптические датчики на основе триангуляционного и амплитудного методов измерения. Недостатками триангуляционного метода является влияние турбулентности среды между датчиком и поверхностью вала на

пространственное положение отраженного излучения, позиционируемое на CCD линейке датчика. В случае применения амплитудного метода весомой является погрешность, вызванная кратковременной нестабильностью амплитуды принимаемого оптического излучения. Поэтому целесообразным является рассмотрение использования фазового метода для реализации датчиков биения валов. Суть метода заключается в измерении разницы фазового сдвига между принятым и зондирующим сигналами. При этом биения исследуемой поверхности приводят к фазовой модуляции высокочастотной огибающей принятого оптического сигнала. Учитывая труднодоступность и тяжелые условия эксплуатации датчиков, предлагается для передачи и приема оптического излучения использовать оптоволоконные линии [5].

Учитывая узкость спектральной характеристики вертикально-излучающих лазеров (VCSEL) [6] обеспечивает возможность когерентного сложения оптических сигналов от двух источников, один из которых можно считать приемником, а второй – соответственно передатчиком. В данном случае, появляется возможность реализации гетеродинного или гомодинного приема, что позволяет перенести спектр информационного сигнала в область промежуточных частот. Тем самым обеспечивается эффективная обработка и выделение сигналов, а также перенастройка в широкой области частот при использовании управляемых синтезаторов частоты [7] в качестве генераторов сигналов. Кроме этого, соответствующим выбором мощности гетеродина удастся подавить все шумы гетеродина (кроме дробового шума). Это обстоятельство позволяет обеспечить максимальное отношение сигнал-шум на приемной стороне. Сигнал фотодетектора при этом зависит только от разности фаз колебаний [12]

$$U(t) = U_0 + U_m \cos(\varphi_x). \quad (1)$$

При вычислении фазового сдвига по формуле (1) нетрудно показать, что вычисления при малых амплитудах биений (виброперемещений) производятся на краях четвертей полного фазового сдвига, где малые значения виброперемещений приводят к большим значениям относительной погрешности вычисления фазового сдвига. Поэтому при получении результата измерения предлагается в измерительную цепь вводить дополнительный фазовый сдвиг с помощью специально подобранных по длине оптоволокон ВОЛ<sub>3</sub>...ВОЛ<sub>6</sub>, что позволит проводить вычисления в оптимальной области  $\varphi_{com} = 45^\circ$ . В этом случае не сложно показать, что выражение (1) на выходе ДУ (рис.1) примет следующий вид

$$U(t) = \cos(\varphi_x + \varphi_{com}). \quad (2)$$

Структурная схема оптоэлектронного датчика биения валов приведена на рис.1. На схеме приняты следующие обозначения: ВОК<sub>1</sub>, ВОК<sub>2</sub> – волоконно-оптические кабели; ВОЛ<sub>1</sub>...ВОЛ<sub>6</sub> – волоконно-оптические линии; ВОЖ<sub>1</sub>, ВОЖ<sub>2</sub> – волоконно-оптические жгуты; ОС<sub>1</sub>, ОС<sub>2</sub> – оптические сплиттеры (разветвители); П – поляризатор; СЗ – система зеркал; Ф – оптический фильтр; А – анализатор; ПЛИ – полупроводниковый лазерный излучатель; ФД<sub>1</sub>, ФД<sub>2</sub> – фотодетекторы (pin фотодиоды); ИУ<sub>1</sub>, ИУ<sub>2</sub> – избирательные усилители; МСЧ – малогабаритный синтезатор частоты; Д – драйвер ПЛИ; Инт – интерфейс; Гт – генератор тактовый; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦСП – цифровой сигнальный процессор; ЭВМ – электронно-вычислительная машина; УСЧ – управляемый синтезатор частоты; ОЧДБ – оптическая чувствительная часть оптоэлектронного датчика биений.

Структура измерительного канала 1 и 2 полностью аналогична.

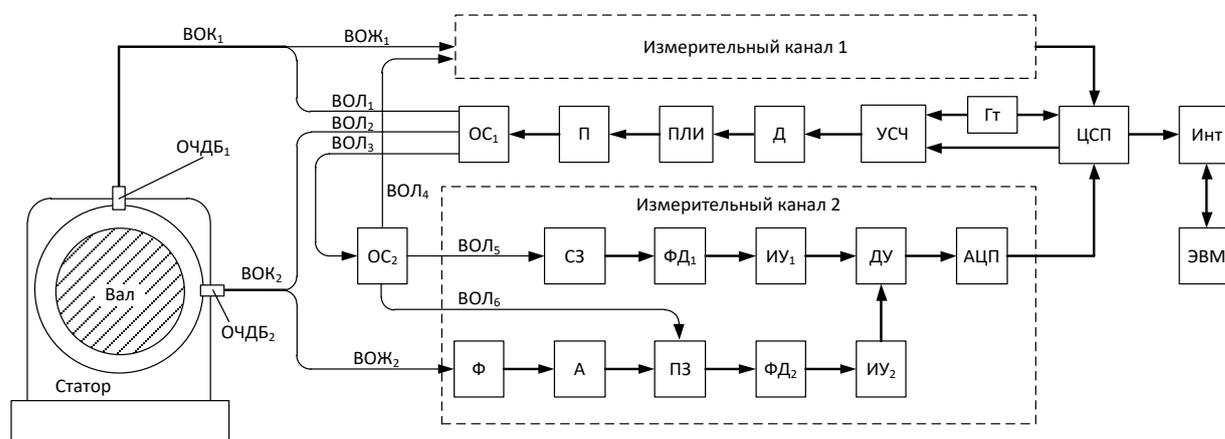


Рисунок 1 – Структурная схема оптоэлектронного датчика биений вала

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– предложенная в докладе структура оптоволоконного датчика может найти применение для контроля биения валов в мощных гидрогенераторах при воздействии сильных электромагнитных полей;

– для предложенной структуры датчика целесообразно определить порог чувствительности и разрешающую способность в зависимости от частоты модуляции зондирующего излучения; проанализировать основные погрешности, возникающие в структуре датчика, с целью реализации способов их компенсации.

1. Левицкий А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль состояния мощных гидро- и турбогенераторов с помощью емкостных измерителей параметров механических дефектов. – Киев: ИЭД НАН Украины, 2011. – 242 с.
2. Eddy Current Displacement Transducer Specifications PR 6423. Application note
3. VibraWatch. Vibration Monitoring System. Application note
4. On-line Monitoring of Hydro Generating Units for Optimized Operation and Maintenance. Application note.
5. Зайцев Е. А. Самокорректирующиеся электронные преобразователи для лазерных измерителей перемещений и вибраций [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05 / Зайцев Е. А.; Нац. акад. наук Украины, ИЭД. – Киев, 2011. – 165 с.
6. Michalzik R., Ebeling K. J. Operating principles of VCSELs // Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices. – Springer Berlin Heidelberg, 2003. – С. 53-98.
7. Зайцев Е.А. Исследование погрешности установки частоты синтезаторов частотно-фазовых систем с использованием LABVIEW// Технічна електродинаміка. -2014.- №2. - с. 84-88.

УДК 621.792.4

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в связи с расширившимися возможностями в области записи и воспроизведения объемного изображения возросла и потребность в использовании такого вида информации в научной и технической сферах. В данном случае с точки зрения высокой точности представления информации очевидны высокие требования к качеству изображения.

Обзор и оценка известных методов подробно рассмотрены в [1, 2]. Из них наиболее точным является голографический метод, но в силу определенных технических и эргономических проблем его использование в настоящее время ограничено. Стереоскопические системы независимо от способа технической реализации при наблюдении с близких расстояний неблагоприятно влияют на нервную систему, вызывая повышенную утомляемость. Поэтому представляет интерес применение метода, называемого «интегральная фотография», но на основе цифровых, а не аналоговых преобразователей «свет-сигнал» и «сигнал-свет».

Результаты теоретического и экспериментального исследований традиционного метода интегральной фотографии с использованием аналогового преобразователя (фотопластинки) рассмотрены в [3]. Замена фотопластинки на цифровые преобразователи в виде светочувствительной матрицы и дисплея, состоящих из отдельных элементов, привела к возникновению двух дополнительных процессов дискретизации (при съемке и воспроизведении), что создало возможность появления новых видов искажений.

Источникам искажений, не связанных с дискретной структурой преобразователя, является отсутствие ограничения поля зрения линзовых элементов. В [4] были обоснованы требования к количеству ракурсов воспроизводимого объекта при использовании интегрального метода на основании условия отсутствия искажений изображения при использовании линзовых элементов без ограничения их поля зрения. При этом допускалось, что точка  $A$  (см. рис. 1), чье изображение формируется (назовем ее центральной), располагалась на перпендикуляре к оси матрицы, проходящем через центр пересечения осей симметрии преобразователя. Назовем этот центр центром матрицы. В этом случае формула для расчета максимального количества ракурсов  $n_{\max}$  в заданном направлении имела вид

$$n_{\max} = \frac{z-F}{F} + 1$$

для четного числа кадров на матрице и

$$n_{\max} = \frac{z-F}{F},$$

где  $z$  – расстояние от точки  $A$  до плоскости линзовой матрицы,  $F$  – фокусное расстояние линзы.

Из этих формул очевидно, что для точек лежащих на оси, проходящей через центр матрицы, максимальное число возможных ракурсов растет с расстоянием между матрицей и объектом и падает с ростом фокусного расстояния линзовых элементов.

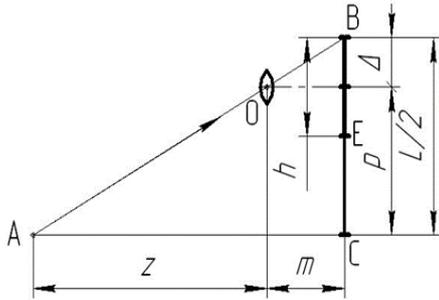


Рисунок 1 – Схема построения изображения центральной точки объекта линзовым элементом матрицы

В общем случае точка *A* объекта может иметь произвольную координату относительно упомянутого выше центра пересечения (рис. 2). Ось *X* на рис. 2 направлена по диагонали преобразователя, а точка *A* имеет на этой диагонали координату  $X_A$  относительно центра *O* пересечения осей симметрии преобразователя. Очевидно, что максимальное количество ракурсов в этом случае будет зависеть не только от координаты  $Z_A$ , и фокусного расстояния линз растра, но от  $X_A$ .

Исходная формула для расчета максимального числа ракурсов может быть получена из подобия треугольников на рис. 2:

$$\frac{\Delta_i}{m} = \frac{-x_A + p_i}{-z_A}$$

где  $p_i$  – расстояние между центром матрицы и изображением точки, построенным *i*-той линзой. прочие обозначения приведены в соответствии с рис. 2.

Чтобы исключить возможность искажений за счет попадания изображения, построенного одной линзой, в поле зрения другой линзы, необходимо соблюдать условие

$$\Delta_{max} = \frac{t}{2},$$

*t* – шаг матрицы и линзового растра по диагонали,  $\Delta_{max}$  – максимально допустимое расстояние от точки пересечения оптической оси линзы с матрицей до изображения точки, причем это расстояние равно половине поперечного размера линзы в данном направлении.

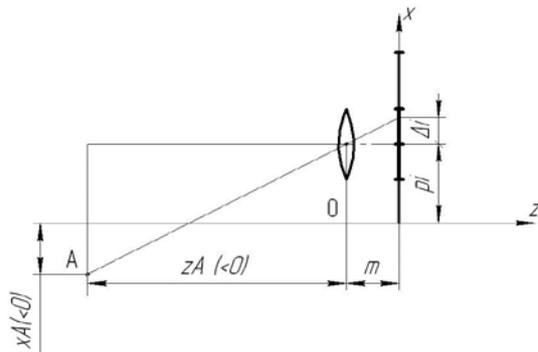


Рисунок 2 – Схема построения изображения произвольной точки объекта линзовым элементом матрицы

Расстояние  $p_i$  между центром матрицы и изображением точки, построенным *i*-й линзой, может быть вычислено по формулам:

$$p_i = t * (i - \frac{1}{2}),$$

для четного числа ракурсов и

$$p_i = t * i$$

для нечетного.

Соответственно неравенства для расчета максимального количества ракурсов имеют вид:

$$n_{max} > \frac{2 * x_A}{z_A * t} - \frac{1}{m} + 1$$

для четного числа ракурсов и

$$n_{max} > \frac{2 * x_A}{z_A * t} - \frac{1}{m} - 1$$

для нечетного.

Анализ двух последних неравенств позволяет сделать вывод о взаимосвязи максимального числа ракурсов, воспроизводимых без искажений, с координатами записываемой точки в пространстве и положением расстоянием между линзами и матрицей. Максимальное число ракурсов растет для точек, удаленных от перпендикуляра к центру матрицы и при увеличении расстояния между линзой и матрицей, падает при удалении точки от системы «линзы - матрица». Так как шаг матрицы равен отношению ее диагонали к числу ракурсов, возможно последние неравенства трансформировать в выражения, связывающие максимальное число ракурсов и диагональ матрицы.

Дискретность преобразователей «свет-сигнал» и «сигнал-свет» является возможным источником дополнительных искажений при записи и воспроизведении объемного изображения. Они могут проявляться как прерывистость ракурсов в поперечном направлении при соответствующем относительном смещении изображения и наблюдателя. Кроме того, возможно возникновение «кулиности», т.е. прерывистости изображения в продольном направлении. Третьим проявлением искажений является ложная информация при неправильном сочетании шагов матриц «свет-сигнал» и «сигнал-свет», а также фокусных расстояний соответствующих линзовых элементов.

Установленные при исследовании вышеперечисленных искажений образуют систему неравенств, решение которой позволит установить требования к параметрам систем записи и воспроизведения объемного изображения.

1. Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering //Frederic Dufaux, Beatrice Pesquet-Popescu, Marco Cagnazzo. May 2013.- 518 p. – Mode of access: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118355113.html> - Date of access: 04.09.2016.
2. Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display Editors: Javidi, Bahram, Okano, Fumio, Son,

- Jung-Young (Eds.) – Mode of access: <https://www.springer.com/us/book/9780387793344> – Date of acces: 04.09.2016.
3. Дудников. Ю.А. Растровые системы для получения объемных изображений / Ю.А.Дудников, Б.К.Рожков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
4. Зайцева, Е.Г., Кислю, А.А. Определение количества ракурсов при записи и воспроизведении объемного изображения // 9-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение–2016». – Минск: БНТУ, 2016. – 60–61

УДК 621.375.826

## ВЛИЯНИЕ ДИСТОРЦИИ ОБЪЕКТИВОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯ

Козлов В. Л., Шмигирев Е. Ф.

Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

Одним из основных источников измерительных ошибок при восстановлении дальности по анализу цифрового изображения являются искажения, вызванные оптической системой стереокамеры, главным образом дисторсией. Дисторсия – это aberrация оптических систем, при которой коэффициент линейного увеличения изменяется по полю зрения объектива. При этом нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением. Оптические искажения, вносимые линзой на фотоприемную матрицу, подразделяются на два вида: радиальные и тангенциальные. Радиальные искажения возникают из-за того, что физическая линза имеет неправильную форму. Например, в некоторых камерах используют не параболические, а сферические линзы, которые проще в изготовлении. В результате возникают искажения изображения, усиливающиеся от центра к краям. Тангенциальные искажения возникают из-за того, что линза в камере расположена не параллельно плоскости матрицы [1].

Наиболее распространенным способом компенсации дисторсии камеры является предварительная калибровка с использованием специального калибровочного объекта, помещаемого в поле зрения камеры [2]. В качестве калибровочного объекта может выступать как периодическая структура, так и случайная текстура с определенными статистическими свойствами. Также находят свое применение и методы, не требующие специального калибровочного объекта, но использующие несколько зарегистрированных изображений одной и той же сцены. Такие методы опираются на априорную информацию о геометрии сцены и решают задачу калибровки с учетом ограничений эпиполярной геометрии [3]. Однако в литературных источниках не приводятся результаты исследований по анализу влияния дисторсии на точность измерения расстояний по стереоизображению, а также не разработаны методики учета и компенсации влияния этого параметра на точность измерений.

Для анализа оптических искажений объективов фотокамер было разработано программное приложение, позволяющее наглядно показать характер искажений и определить коэффициенты полинома, компенсирующего оптические искажения. Были проведены экспериментальные исследования оптических искажений следующих объективов и фотокамер:

- Canon EOS 1100D (с объективом EFS 18-55);
- Nikon D3200 (с объективами AF-SDX NIKKOR 18-55; AF-S NIKKOR 18-105; TAMRON AF 70-300);
- Canon PowerShot A550;
- Fujifilm FinePix Real 3D W3.

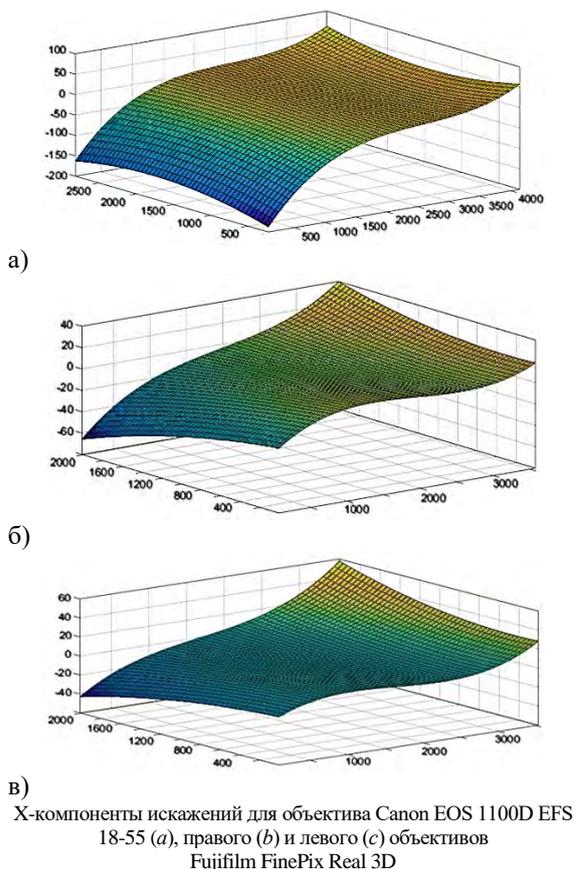
Выбор в качестве объекта исследования серийно выпускаемой 3D-фотокамеры Fujifilm FinePix Real 3D обусловлен тем, что она используется в качестве компактного решения аппаратной части дальномера на основе корреляционного анализа цифровых изображений [4]. На рисунках приведены результаты измерения оптических искажений объективов фотокамер Canon EOS 1100D и Fujifilm FinePix Real 3D. В горизонтальной плоскости по осям  $OX$  и  $OY$  приведены координаты точки на фотоприемной матрице, а по вертикальной оси приведена величина оптических искажений в пикселях для данной точки по оси  $OX$ .

Экспериментальные исследования показали, что оптические искажения исследуемых объективов Canon и Nikon можно успешно аппроксимировать известными формулами [1-3]. Скорректированные точки для радиальных искажений можно получить с помощью следующих выражений:

$$x_{corrected} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6),$$

$$y_{corrected} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6),$$

где  $(x, y)$  – координаты точки исходного изображения,  $r$  – удаленность точки от оптического центра линзы.



Тангенциальные искажения определяются двумя параметрами  $p_1$  и  $p_2$ :

$$x_{corrected} = x + 2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2),$$

$$y_{corrected} = y + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2x.$$

Таким образом, общая модель искажения характеризуется пятью параметрами, которые составляют вектор искажения ( $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, p_1, p_2$ ). Остальные искажения, возникающие в оптической системе, вносят значительно меньший вклад и их можно не учитывать.

Однако, как показали результаты проведенных исследований для фотоаппарата Fujifilm Fine Pix Real 3D использование приведенных формул для компенсации дисторсии не обеспечивает требуемую точность при измерении расстояний, поэтому для компенсации дисторсии были проведены дополнительные исследования. Для используемой фотокамеры Fujifilm FinePix Real 3D W3 дисторсия цифрового изображения неодинакова для объективов стереокамеры и достигает величины  $\pm 20$ – $35$  пикселей на краях фотоприемной матрицы. Различие в значениях оптических искажений для двух объективов обусловлены неодинаковым наклоном фотоприемной матрицы к оптической оси объектива. Из полученных экспериментальных данных следует, что для аппроксимации оптических искажений объективов Fujifilm FinePix Real 3D W3 достаточно полинома третьей степени. Взаимный наклон плоскостей фотоприемных матриц и

оптические аберрации приемных линз можно компенсировать с помощью экспериментально определенных полиномов, которые для первого  $P'$  и второго  $P''$  объективов стереокамеры Fujifilm FinePix Real 3D имеют вид

$$P' = -12,1738 + 3,90 \cdot 10^{-2} \cdot x - 2,68 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 5,37 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 5,07 \cdot 10^{-3} \cdot y - 5,68 \cdot 10^{-6} \cdot y^2 + 2,59 \cdot 10^{-10} \cdot y^3 + 5,85 \cdot 10^{-7} \cdot xy - 1,51 \cdot 10^{-10} \cdot x^2y + 4,49 \cdot 10^{-9} \cdot xy^2,$$

$$P'' = -22,3481 + 5,38 \cdot 10^{-2} \cdot x - 3,00 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 5,07 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 1,02 \cdot 10^{-2} \cdot y - 6,36 \cdot 10^{-6} \cdot y^2 - 1,96 \cdot 10^{-10} \cdot y^3 + 5,51 \cdot 10^{-6} \cdot xy - 1,83 \cdot 10^{-11} \cdot x^2y + 4,04 \cdot 10^{-9} \cdot xy^2.$$

Значениями коэффициентов полинома порядка  $10^{-10}$  нельзя пренебрегать, так как они находятся при переменных в третьей степени, а величины  $x$  и  $y$  могут иметь значение  $\sim (3 \div 4) 10^3$ .

В расчетные формулы для измерения дальности [4] входят фокус оптической системы  $f$ , база съёмки  $L$  и размер пикселя  $\omega_x$ , которые можно объединить в аппаратную константу  $K$ :

$$K = \frac{f \cdot L}{\omega_x}.$$

Знать точное значение расстояния между чувствительными элементами фотоприемной матрицы  $\omega_x$ , значение фокуса объектива  $f$  и базы съёмки  $L$  нет необходимости, так как значение аппаратной константы измерительной системы  $K$  можно определить при калибровке системы по объектам, находящимся на известных расстояниях.

Таким образом, с учетом компенсации оптических искажений первого и второго объективов стереокамеры выражение для расчета дальности до объекта по стереоизображению имеет вид

$$Z = \frac{K \cos\left(\arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}{\Delta x - \Delta X + P' - P''},$$

где  $K$  – аппаратная константа измерительной системы;  $\Delta x$  – сдвиг между изображениями объекта по горизонтальной оси;  $\Delta y$  – сдвиг между изображениями объекта по вертикальной оси;  $\Delta X$  – сдвиг по оси  $x$  за счет непараллельности оптических осей объективов;  $P', P''$  – полиномы, компенсирующие искажения объективов стереокамеры.

Необходимо отметить, что для повышения точности измерения расстояний определяющим фактором является не абсолютное значение дисторсии объективов, а разность вносимых оптических искажений объективов стереокамеры в зависимости от разности координат измеряемого объекта на фотоприемных матрицах. Экспериментальные исследования разработанной методики учета и компенсации влияния искажений на точность измерений дальномера на основе корреляционного анализа стереоизображения показали уменьшение абсолютной погрешности измерений более чем на порядок при измерениях на расстояниях до 100 м.

1. Alemán-Flores, M. Automatic Lens Distortion Correction Using One-Parameter Division Models / M. Alemán-Flores, L. Alvarez, L. Gomez, D. Santana-Cedres // Image Processing On Line. - 2014. - Vol. 4. - P. 327-343. - DOI: 10.1007/s10851-012-0342-2.
2. Бугаенко, Е. И. Способ автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии на цифровых изображениях / Е. И. Бугаенко, М. И. Труфанов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 16–22.
3. Zhang, Z. Camera calibration with lens distortion from low-rank textures / Z. Zhang, Y. Matsushita, Y. Ma // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Conference. - 2011. - P. 2321-2328.
4. Способ измерения расстояний на цифровой фотокамере: патент 2485443 Российская Федерация / В. Л. Козлов. – 2013. – Бюл. № 17.

УДК 621.375.

## АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ОТТИСКОВ ПЕЧАТЕЙ И ШТАМПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Козлов В. Л., Згировская Н. В.

*Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь*

Одной из важных задач криминалистической экспертизы является изучение цвето-тоновых параметров и анализ дефектов цифровых моделей изображений оттисков печатей и штампов (ОПШ). Известные методики сравнительного исследования оттисков печатей, которые проводятся на основе сопоставления и наложения [1] и корреляционного анализа [2] не позволяют получить количественные данные о степени старения оттиска печати и о координатах дефекта любого фрагмента печати. Важной задачей также является преобразование полученных цифровых данных в криминалистически значимую информацию, что возможно только путем использования специализированного ПО, алгоритмы работы которого позволяют осуществлять необходимый подсчет и интерпретацию соответствующих параметров изображения.

Применение корреляционной обработки оптических изображений является одним из направлений повышения качества цифровой обработки оттисков удостоверительных печатных форм [2]. Для расширения функциональных возможностей, повышения качества и достоверности исследований цвето-тоновых параметров оттисков печатей и штампов, а также для получения информации о степени старения оттиска печати и дефектах отдельных фрагментов была разработана соответствующая компьютерная система на основе применения методов корреляционного анализа. Предлагаемый процесс цифровой обработки ОПШ предусматривает: фиксацию изображения путем сканирования (регистрация изображения); применение алгоритмов обработки, предусмотренных используемым ПО (преобразование изображения); сохранение данных с последующей экспертной интерпретацией результатов (анализ данных изображения).

Сканирование как способ регистрации изображений позволяет получать цифровые

модели ОПШ, максимально соответствующие реальной действительности по своим геометрическим, топографическим и колористическим характеристикам. Формат хранения изображений может быть различным (JPEG, TIFF, PXS, PNG, BMP и др.). Одним из наиболее корректных форматов, применяемых при регистрации изображений ОПШ является несжатый растровый графический формат TIFF. Проведенные экспериментальные исследования показали, что значение корреляционной функции для новой печати в формате JPEG составляет порядка 0,998, а для формата TIFF – 0,99993. Это свидетельствует о том, что для проведения экспертных исследований целесообразно использовать документы в формате TIFF, т.к. он дает более высокую точность вычисления корреляционной функции, и, следовательно, большую эффективность проведения исследований по сравнению с JPEG форматом.

Этап преобразования изображений можно условно разделить на две стадии: предварительную, которая заключается в приведении сравниваемых изображений в соответствие определенным критериям для проведения дальнейшего исследования, и основную, предусматривающую корреляционный анализ изображений. Предварительная обработка может быть осуществлена путем использования различного рода универсального ПО («Adobe Photoshop», «CorelDRAW», «Microsoft Paint» и т.п.). Однако анализ специальной литературы показал, что наиболее распространенным графическим редактором, применяемым при технико-криминалистических исследованиях является программный продукт «Adobe Photoshop». При этом использование возможностей данного программного средства сводится к минимальному набору функций, что обусловлено необходимостью максимально сохранить все первоначальные параметры изображения без каких-либо искажений.

Основная стадия этапа преобразования изображений заключается в непосредственном сравнении цифровых моделей исследуемых оттисков, используя алгоритмы корреляционного типа [3]. Для реализации корреляционной методики анализа было разработано программное приложение (ПП) на языке программирования java (далее – ПП «CIPSS», от англ. Comparing Images of Prints of Seals and Stamps – сравнение изображений оттисков печатей и штампов). Программное приложение имеет два синхронизированных рабочих окна. Левое окно предназначено для ввода исследуемого изображения, т.е. изображения, чьи характеристики подлежат непосредственному изучению, а правое – для ввода изображения-эталона. Интерфейс приложения обеспечивает выполнение следующих пользовательских функции: изменение размера изображений в окне; выбор вида корреляционной функции; определение спектрального диапазона анализа отдельно в красном, зеленом и синем участках спектра, а также в их суммарном диапазоне, в зависимости от цветности реального изображения. Производство корреляционного анализа цвето-тоновых параметров изображений обеспечивается путем вычисления значения двумерной нормированной корреляционной функции NCC [3] между выделенными фрагментами изображений:

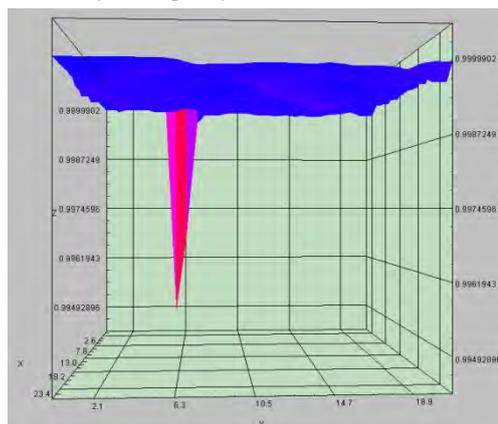
$$K(d) = \frac{\sum_{u,v} (I_1(u,v) - \bar{I}_1) \cdot (I_2(u+d,v) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{u,v} (I_1(u,v) - \bar{I}_1)^2 \cdot \sum_{u,v} (I_2(u+d,v) - \bar{I}_2)^2}},$$

где  $I_1$ ,  $I_2$  – интенсивность первого и второго изображения;  $u$ ,  $v$  – координаты на фотоприемной матрице;  $d$  – сдвиг между окнами сканирования. Для определения степени различия выделенных изображений используется нормализованная сумма квадратов разностей NSSD [3].

$$K(d) = \sum_{u,v} \left( \frac{I_1(u,v) - \bar{I}_1}{\sum_{u,v} (I_1(u,v) - \bar{I}_1)^2} - \frac{I_2(u+d,v) - \bar{I}_2}{\sum_{u,v} (I_2(u+d,v) - \bar{I}_2)^2} \right)^2.$$

Нормированная кросс-корреляция применима в случае, когда одно изображение отличается от другого, не только относительным сдвигом, но и подвержено монотонному амплитудному преобразованию. График зависимости значения КФ от разности координат между рабочими окнами по оси X в пикселях представляется в нижнем окне интерфейса. В результате анализа выводится максимальное (или минимальное) значение корреляционной функции с указанием координат точки совпадения и сдвига по осям x и y для рассматриваемой области на втором снимке относительно первого. Также выводится трехмерный график корреляционной функции.

Программное приложение позволяет построить карту корреляции выбранной области изображения для нахождения мелких, незаметных глазу повреждений изображенного объекта (изношенность, мелкие физические повреждения и т.д.). Пример работы приложения для анализа и обнаружения дефектов представлен на рисунке. Возможно формирование карты корреляции либо для всей печати, либо для любого выделенного фрагмента. На исследуемом изображении оттиска печати формируется окно сканирования, размером от 3x3 до 7x7 пикселей в зависимости от требуемого разрешения карты корреляции. Автоматически окно сканирования с такими же координатами формируется на эталонном изображении и вычисляется значение корреляционной функции NCC между выделенными фрагментами. Затем оба окна сканирования последовательно сдвигаются на величину как по оси x, так и по оси y, и после каждой итерации вычисляется значение корреляционной функции. Таким образом, осуществляется построение карты корреляции изображений эталонной и исследуемой печатей. Трехмерный вид карты корреляции представлен на рисунке, где минимальное значение КФ соответствует дефекту печати.



Трехмерный вид карты корреляции для выбранной области

Полученные результаты корреляционного анализа изображений требуют соответствующей экспертной интерпретации. Исследуемые параметры должны быть доступны и просты для понимания лицам, не обладающим специальными познаниями в данной области. В этой связи был разработан алгоритм, целью применения которого является определение в процентном соотношении показателя совпадения  $P_c$  цвето-тоновых параметров сравниваемых изображений ОПШ на основе значения КФ:

$$P_c = \frac{K_{\max}}{1 - K^1},$$

где  $K_{\max}$  – максимальное значение КФ (постоянная величина, равная 0,99);  $K^1$  – рабочее значение КФ, полученное в ходе анализа изображений. С криминалистической точки

зрения, значение КФ не менее 0,99 свидетельствует о полном совпадении колористических характеристик исследуемых изображений, значение КФ менее 0,97 и ниже может свидетельствовать о значительном или полном различии исследуемых характеристик.

1. Технико-криминалистическая экспертиза документов: учеб. пособие / Н.В. Ефременко (и др.); под ред. Н.В. Ефременко. – Минск: Акад. МВД РБ, – 2012. – 343 с.

2. Четверкин, П.А. Методы цифровой обработки слабовидимых изображений при технико-криминалистическом исследовании документов: дисс. ... к.ю.н: 12.00.09 / П. А. Четверкин. – М., 2009. – 246 с.
3. Устройство для сравнения цифровых изображений оттисков печатей и штампов для криминалистической экспертизы: пат.10722 Респ. Беларусь, МКИ G 01 С 3/00 / В. Л. Козлов, А. С. Рубис; А.С., Р.М. Ропот – 2015.

УДК 531.383

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДВУХОСНОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Королёв М.Н.

Тульский государственный университет  
Тула, Российская Федерация

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) – это датчик вращения прямого преобразования, который выполняется по волоконно-оптической технологии.

Любой ВОГ содержит волоконно-оптический преобразователь «минимальной конфигурации» и электронный блок, в котором обрабатываются аналоговые сигналы. Основное достоинство оптических измерительных технологий – высокая точность, практически мгновенное время готовности, отсутствие возмущающих моментов приложенных к стабилизируемой платформе, высокая устойчивость к электромагнитным помехам, а также механическим и температурным возмущениям [3].

В статье рассматриваются особенности построения электрической схемы цифрового управления гиросtabilизатором с применением в качестве чувствительных элементов ВОГ. На рис.1 приведена структурная схема разрабатываемой системы, которая решает две задачи: задачу стабилизации и задачу управления положением платформы в пространстве. На рис. 1 представлена структурная схема двухосного гироскопического стабилизатора.

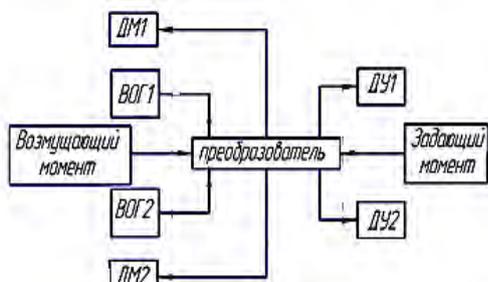


Рисунок 1 Структурная схема двухосного гироскопического стабилизатора

Принцип работы системы следующий: при возникновении возмущающего момента ВОГ фиксирует угловое движение, выдавая сигнал, который подается на систему управления.

Система управления подает сигнал на датчик момента (ДМ), который возвращает объект стабилизации в исходное положение [2].

В качестве преобразователя (рис.1) необходимо выбрать микроконтроллер, который обеспечивает обработку сигналов с ВОГ, управление ДМ, функционирование ДУ и питание системы. Помимо этого преобразователь также должен формировать необходимые законы управления [1]. Для обработки сигналов с перечисленных элементов в состав схемы введен микроконтроллер STM32-F4.

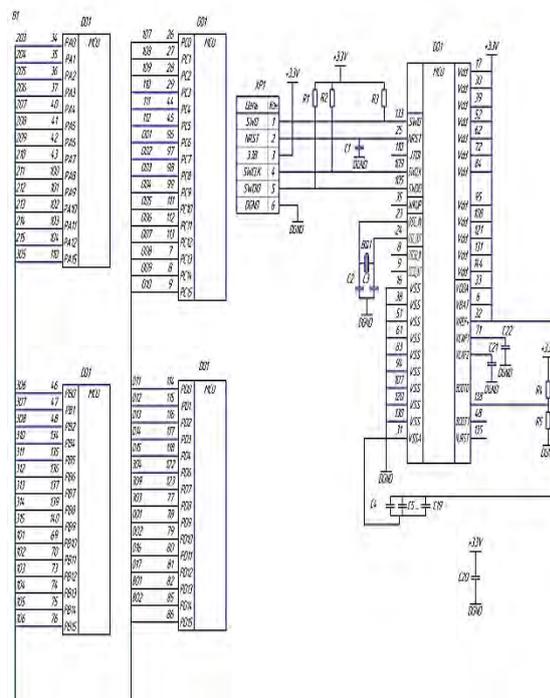


Рисунок 2 – Подключение микроконтроллера STM32-F4

Обработка сигналов с ДУ осуществляется с помощью микросхемы AD2S1210 и фильтра на базе микросхемы AD8661ARZ (рис. 3).

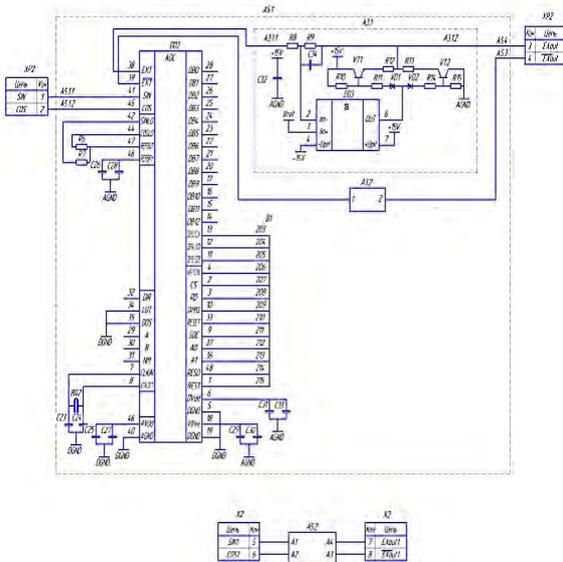


Рисунок 3 – Подключение микросхемы AD2S1210 и фильтра на базе микросхемы AD8661ARZ

Для согласования сигналов с ДМ используется микросхема на базе полевых транзисторов IRF7351. Для защиты сигналов контролера токов ДМ используется схема гальванической развязки на базе IR2011S (рис. 4).

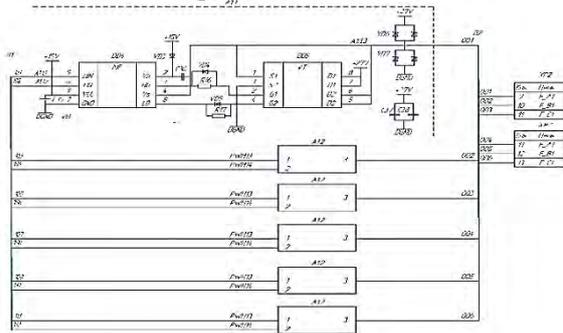


Рисунок 4 – Схема гальванической развязки на базе микросхемы IR2011S

Для согласования аналоговых выходов ВГ095м с цифровым входом STM32-F4 используется микросхема AD8571. Для предотвращения усиления и снижения аналоговых шумов выходного сигнала датчика угловой скорости использовался фильтр на базе микросхемы OP2177AR (рис.5).

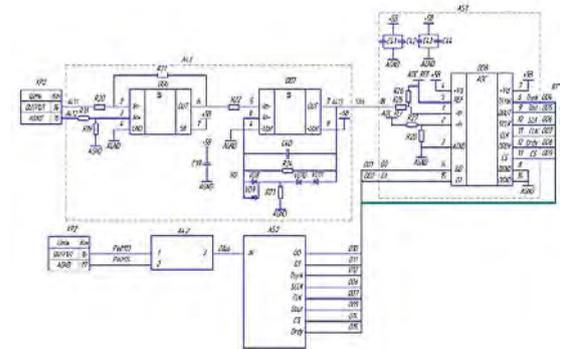


Рисунок 5 – Подключение фильтра на базе микросхемы AD8661ARZ

Питание прибора осуществляется однополярным напряжением 27 В. При этом для нормального функционирования контроллера необходимо сформировать однополярное напряжение 3,3 В. Для питания аналоговой части и ВОГов необходимо однополярное напряжение 5 В. Для питания схемы управления ДМ необходимо двуполярное напряжение  $\pm 15В$ .

В свою очередь необходимо высокостабильное питание аналого-цифрового преобразователя (АЦП) по каналу ВОГ и ДМ с целью снижения шумов. В связи с этим в схему введены импульсные источники питания (ИИП) TEN82411W1. Использование ИИП обусловлено тем, что они обладают более высоким КПД (80-90%) по сравнению с линейным источником тока, коэффициент полезного действия которого составляет порядка 60%. Таким образом, использование ИИП способствует снижению энергозатрат прибора [4]. Для формирования референсных уровней напряжения по каналу ВОГ и ДМ для АЦП используется линейный стабилизатор напряжения, построенный на базе микросхем LM317EMP и REF198 (рис. 6)

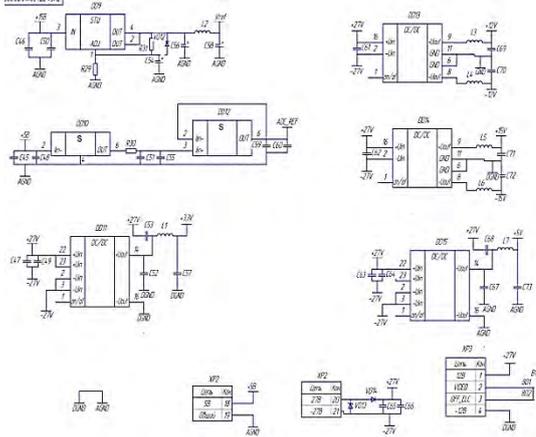


Рисунок 6 – Линейный стабилизатор напряжения, построенный на базе микросхем LM317EMP и REF198

Использование линейной стабилизации объясняется тем, что общее потребление схемы преобразователя сигналов незначительно, но при этом линейная стабилизация обладает меньшим уровнем шума по сравнению с импульсной стабилизацией. Таким образом, потери из-за низкого КПД линейных стабилизаторов оказывает несущественное влияние, при этом обеспечивается низкий уровень шума.

1. Бабич, О.А. Обработка информации в навигационных комплексах / О.А. Бабич. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
2. Распопов, В.Я. Теория гироскопических систем. Инерциальные датчики / В.Я. Распопов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 256 с.
3. Шереметьев, А.Г. Волоконно-оптический гироскоп / А.Г. Шереметьев. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
4. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.: ил. (Библиотека ЭМС).

УДК 621.375.826

## ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ И ВЫХОДА НА РАБОЧИЙ РЕЖИМ ВИБРОПРИВОДА ЦИФРОВОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Кривицкий П.Г., Исаев А.В., Матюшевский В.М., Оксенчук И.Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Цифровой малогабаритный лазерный гироскоп (далее ЦМЛГ) [1] является сложным по конструкции и функционированию устройством. Его характеристики определяются оптимальностью выбора значений ряда рабочих параметров.

Одной из основных подсистем электронного обеспечения ЦМЛГ формирует частотную подставку для создания невзаимности встречных волн в резонаторе кольцевого лазера (КЛ) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид КЛ

Эта подсистема подключается к виброподвесу (ВП) (рисунок 2) [2], на котором размещается КЛ.



Рисунок 2 – Виброподвес КЛ

Колебательные движения ВП приводят к возникновению разности частот встречных волн в КЛ, пропорциональной мгновенной угловой скорости его колебаний. Их типичная частота составляет 400–500 Гц, а амплитуда – 3–5 угл. мин.

Колебания виброподвеса возбуждаются за счет обратного пьезоэлектрического эффекта путем подачи периодического напряжения на обкладки пьезопластин, приклеенные к его лепесткам. Для драйвера вибропривода (ДВП) пьезопластины в качестве нагрузки представляют собой конденсаторы с суммарной емкостью 0,3–1 мкФ. Традиционно формирование сигнала виброподставки производилось аналоговыми электронными схемами. В настоящее время аналоговая электроника вытесняется цифровыми схемами с

применением широтно-импульсного управления (рисунок 3) [3].

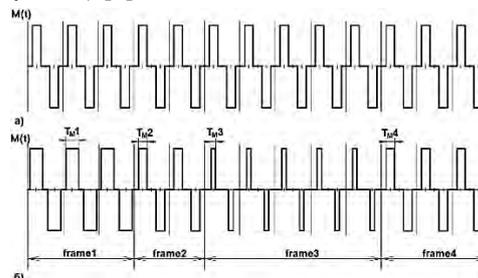


Рисунок 3 – Последовательность временных интервалов ШИМ в процессе проведения «ошумления» виброподставки: а) «ошумления» нет, б) зависимость величины момента  $M(t)$  в режиме «ошумление»

Применение импульсного управляющего сигнала драйвера виброподвеса приводит к ударным воздействиям на пластины виброподвеса, вызывающим в них помимо основных крутильных колебаний вторичные высокочастотные гармоники. Эти колебания не вносят вклада в амплитуду частотной «подставки», поскольку моноблок КЛ на виброподвесе представляет собой высокочастотную колебательную систему с резонансной частотой около 400 Гц.

Кроме того, в ЦМЛГ применяется датчик углового положения (ДУП), конструктивно представляющий собой одну из пьезопластин виброподвеса, не подключенную к выходу ДВП. Эта пьезопластина подключена к входу схемы определения положения равновесия виброподвеса (датчика «нуля»), а также к входу АЦП для определения отклонения от положения равновесия в момент измерения мгновенного углового положения ЛГ. Акустические волны, вызванные импульсным сигналом возбуждения приводят к появлению модуляции в сигнале ДУП и, соответственно, к снижению точности определения «нулевого» положения и мгновенного углового положения моноблока КЛ относительно основания в момент измерения.

Поэтому в ЦМЛГ для возбуждения виброподвеса используется управляющий сигнал синусоидальной формы, формируемый на выходе ЦАП микроконтроллера, а ошумление частотной подставки производится путем изменения амплитуды управляющего сигнала по квазислучайному закону. Возможны различные способы ошумления: амплитуда подставки меняется как случайная величина в заданном диапазоне значений, либо имеются два значения амплитуды, которые переключаются случайным образом. В последнем случае можно ввести дополнительные поправки к случайному значению амплитуды

такие, чтобы среднее значение управляющего сигнала на заданных интервалах времени (например, 1 с) оставалось постоянным. Это позволяет точнее производить стабилизацию амплитуды при температурных уходах [4].

Имеется важная особенность – область применений ЦМЛГ включает инерциальные навигационные системы, в которых используется блоки чувствительных элементов с тремя жестко связанными на одном основании лазерными гироскопами (ЛГ) с взаимно перпендикулярными осями чувствительности к вращению (рисунок 4) [5].

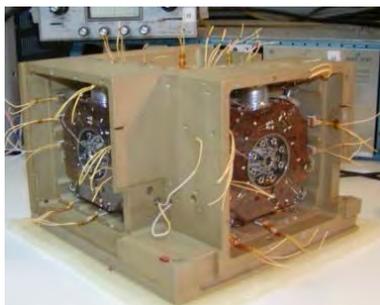


Рисунок 4 – Блок чувствительных элементов с тремя ЛГ

В этом случае образуется механическая колебательная система с тремя источниками возбуждения, связанными через общее основание. Необходимо разнести частоты виброколебаний всех трех ЛГ на 20–40 Гц. В противном случае будет наблюдаться перетекание колебательной энергии между ними и, как следствие, неконтролируемые амплитуды их раскачки. Это приводит к резкому ухудшению точностных характеристик ЛГ и навигационных систем на их основе.

Расчеты в работе [3] показывают: для импульсного управления виброподвесом обеспечивается

выход на установившееся значение амплитуды за доли секунды, что трактуется как достоинство такого способа управления. Однако при работе в блоке чувствительных элементов из трех ЛГ быстрая раскрутка их виброподвесов приводит к возникновению состояний такой совместной колебательной системы, спектральный состав которой и распределение типов колебаний по элементам конструкции невоспроизводимы от включения к включению. Это приводит к дополнительному разбросу показаний ЛГ и в разы понижает точность самовыставки навигационной системы. Поэтому для ЦМЛГ в программу микроконтроллера включен код, который обеспечивает плавное увеличение амплитуды колебаний виброподвеса от нуля до номинального значения за 1–2 с, что вполне допустимо для обеспечения типичного времени функциональной готовности 10–15 с.

1. Кривицкий П.Г., Матюшевский В.М., Оксенчук И.Д. Цифровой малогабаритный лазерный гироскоп. Материалы 9-й МНТК «Приборостроение-2016». – Мн.: БНТУ, 2016. – С. 82-83.
2. Filter wheels (dithering wheels) are the key components of ring laser gyroscopes. <http://www.mh-elec.com/photo-x.php?id=221>
3. Енин В.Н., Санеев В.И. Цифровой автогенератор виброподставки лазерного гироскопа. Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 05. С.154–177.
4. Кривицкий П.Г., Оксенчук И.Д. Влияние температуры на резонансную характеристику вибропривода кольцевого лазера. Материалы 13-й МНТК «Наука – образованию, производству, экономике» в 4 томах. Том 2. – Мн.: БНТУ, 2015. – С. 164.
5. Зуйков И.Е., Кривицкий П.Г., Оксенчук И.Д. Адаптивная бесплатформенная инерциальная навигационная система. Пятый белорусский космический конгресс 25–27 октября 2011 года. Материалы конгресса. – ОИПИ НАН Беларуси, Минск. – Т. 2. – С.247-251.

УДК 621.375.826

## СТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ВИБРОПРИВОДА ЦИФРОВОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА ПО ФАЗЕ МЕЖДУ СИГНАЛОМ УПРАВЛЕНИЯ ДРАЙВЕРОМ ВИБРОПРИВОДА И СИГНАЛОМ ДАТЧИКА УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Кривицкий П.Г., Исаев А.В., Матюшевский В.М., Оксенчук И.Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Важной частью цифрового малогабаритного лазерного гироскопа (далее ЦМЛГ) [1] является система частотной подставки вибрационного типа, включающая механическую часть – виброподвес (ВП) [2], и электронный блок его управления – драйвер вибропривода (ДВП). ВП обеспечивает угловые колебания кольцевого лазера (КЛ) вокруг его оси чувствительности с частотой 400 – 500 Гц и амплитудой 3 – 5 угл. мин. ДВП, управляемый через ЦАП микроконтроллера (МК), формирует синусоидальный сигнал возбуждения ВП,

который подается на пьезоэлектрические пластины, приклеенные к лепесткам ВП таким образом, что за счет обратного пьезоэлектрического эффекта происходит деформация лепестков ВП, приводящая к крутильным колебаниям приклеенного к ВП КЛ.

Экспериментально полученная резонансная характеристика ВП ЦМЛГ представлена на рисунке 1. Сдвинутая влево резонансная характеристика получена при сканировании частоты ВП в прямом направлении (с увеличением частоты), а сдвинутая вправо кривая – в обратном.

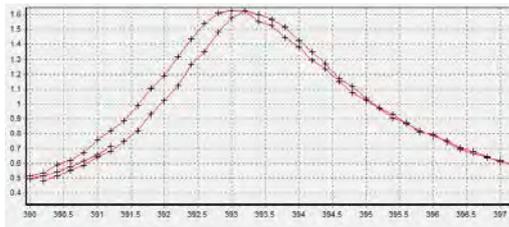


Рисунок 1 – Резонансная характеристика ВП ЦМЛГ (по горизонтальной оси – частота крутильных колебаний ВП, Гц, по вертикальной оси – амплитуда крутильных колебаний ВП, угл.мин.)

Работа ВП на резонансной частоте (или вблизи ее) позволяет минимизировать потребляемую им мощность, что позволяет уменьшить разогрев элементов конструкции ЦМЛГ и соответствующие температурные дрейфы его выходного сигнала [2].

Для настройки частоты ВП на резонанс применяется аппаратная либо программная ее модуляции (с частотой модуляции от долей Гц до нескольких кГц) с выделением сигнала коррекции средней частоты ВП.

Побочным отрицательным эффектом такого режима стабилизации частоты ВП является усложнение задачи стабилизации амплитуды колебаний ВП, поскольку ее приходится производить с постоянной времени, на порядок превышающей период модуляции ВП. Это негативно отражается на точностных характеристиках ЦМЛГ в динамике.

Введение ошумления амплитуды колебаний ВП, необходимое для предотвращения синхронизации частот встречных волн в КЛ, также существенно ухудшает настройку частоты ВП.

Еще одна проблема вышеуказанного режима настройки частоты ВП может проявиться в случае применения блока лазерных гироскопов (БЛГ), т.е. сборки из тех ЛГ, закрепленных на общем жестком основании в трех взаимно перпендикулярных осях [3].

Недоработки при конструировании БЛГ, отсутствие этапа моделирования его вибрационных характеристик приводят к увеличению взаимовлияния ВП отдельных ЛГ в блоке. Это проявляется в искажениях резонансных характеристик их ВП и даже к появлению дополнительных экстремумов на резонансных частотах ВП ЛГ в блоке. Изменчивость таких связей в процессе работы БЛГ приводит к нарушениям в системах стабилизации, перекачке энергии колебаний между ЛГ и соответствующим скачкообразным изменениям амплитуды их виброколебаний.

На рисунке 2 представлены экспериментальные графики резонансных характеристик ВП ЛГ в трехосевом БЛГ, полученные в ходе разработки конструкции БИНС-А.

Поэтому при разработке управляющей программы для МК ЦМЛГ применен другой способ настройки и коррекции частоты ВП.

В качестве контрольного сигнала берется не максимальное значение амплитуды ВП и ее отклонения из-за модуляции частоты ВП, а фаза между управляющим сигналом возбуждения ВП и сигналом Д0 датчика углового положения, определяющим момент прохождения «нулевого» (равновесного) положения ЛГ.

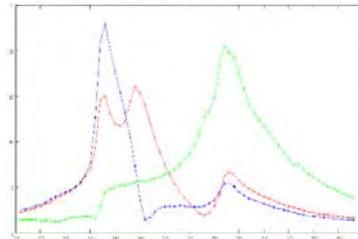


Рисунок 2 – Резонансные характеристики ВП ЛГ в трехосевом БЛГ

На рисунке 3 представлены осциллограммы сигнала возбуждения ВП (1) и сигнала датчика углового положения (2) в режиме резонанса. Сигнал возбуждения подается на пьезопластины ВП, а сигналом датчика углового положения является напряжение на пьезопластине, также приклеенной на один из «лепестков» ВП. Видно, что оба сигнала практически совпадают по фазе.

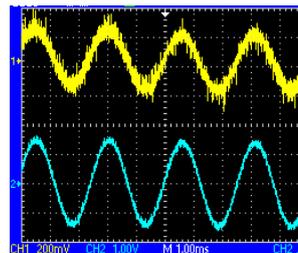


Рисунок 3 – Осциллограммы сигнала возбуждения ВП (1) и сигнала датчика углового положения (2)

Определение и стабилизация фазы выполняется в функции **tune\_faza()**, вызываемой из обработчика прерываний **HAL\_DAC\_ConvCpltCallbackCh1()** по завершению выдачи в ЦАП выборки реализации периода управляющего сигнала ВП в программе МК.

В ней выполняется определение текущего значения времени (в тактах таймера частотой 64 МГц):

```
ifaza_dac = htim2.Instance->CNT;
```

Затем определяется интервал времени от момента прихода сигнала Д0:

```
ifaza_d0c1 = ifaza_dac - tim2ch1capture;
```

И вычисляется само значение фазы в долях периода (значение 0,5 равно 180 град.):

```
faza_x = ifaza_d0c1 / (ViTim8 * 64.);
```

где **ViTim8** – число тактов частотой 64 МГц между выборками ЦАП, а **64** – длина реализации периода управляющего сигнала ВП.

Экспериментальная зависимость вышеописанной фазы и амплитуды колебаний от частоты ВП представлена на рисунке 4. Провалы на амплитудной зависимости вызваны вторичными резонансами конструкции макета ЛГ.

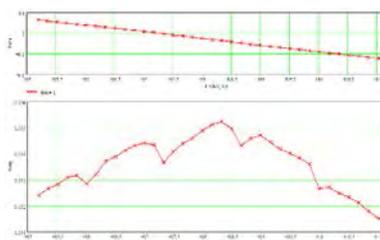


Рисунок 4– Зависимость фазы от частоты ВП ЛГ

Реализованный в ЦМЛГ способ настройки и коррекции частоты ВП включает три последовательных этапа. На первом этапе должна определяться температура корпуса ВП и за 1 – 3 сек выполняться плавная его раскрутка до заданной амплитуды. Затем в течение 3 – 6 сек выполняется настройка на максимум амплитуды колебаний ВП с определением контрольного значения фазы. И,

наконец, происходит переход в рабочий режим стабилизации этого контрольного значения путем коррекции частоты колебаний ВП.

Опытная наработка ЦМЛГ с данным режимом настройки частоты ВП по фазе показала его стабильность и надежность функционирования.

1. Кривицкий П.Г., Мапошевский В.М., Оксенчук И.Д. Цифровой малогабаритный лазерный гироскоп // Материалы 9-й МНТК «Приборостроение-2016». – Мн.: БНТУ, 2016. – С. 82-83.
2. Кривицкий П.Г., Оксенчук И.Д. Влияние температуры на резонансную характеристику вибропривода кольцевого лазера. Материалы 13-й МНТК «Наука – образованию, производству, экономике»: в 4 т. – Минск: БНТУ, 2015. – Т 2.– С. 164.
3. Зуйков И.Е., Кривицкий П.Г., Оксенчук И.Д. Адаптивная бесплатформенная инерциальная навигационная система // Пятый белорусский космический конгресс: материалы конгресса. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2011. – Том 2.С.247-251.

УДК 621.382.019.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Манего С.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Анализ практики передовых мировых производителей светодиодных устройств (СУ) позволяет сделать вывод, что непосредственным результатом превращения качества в основной фактор конкурентоспособности стал отказ от методов контроля и отбраковки как средства обеспечения надежных свойств и выработки гарантий качества для потребителей. Среди причин, ограничивающих возможность применения этих методов в современных условиях, являются: стоимостные ограничения, физические ограничения и организационные ограничения.

Невозможность эффективно разрешить указанные ограничения стимулировала переход к более совершенным системам, основанным на концепции предотвращения появления дефектов. В качестве методической основы работ, ведущихся в этом направлении в промышленно развитых странах, наиболее широко используется международная система стандартов ISO 9000. В то же время потребности разработки новых или совершенствования существующих систем управления качеством требуют для своей реализации наличия адекватной научно-методологической базы и формирования новых подходов решения данной проблемы. В качестве таковых в последнее время разрабатываются направления создания «имитационных моделей» деградации оптоэлектронных устройств и проведение ускоренных испытаний, которые позволяют достаточно точно предсказать надежность СУ. Где в качестве основных критериев использовались: минимизация экономических затрат, надежность полученных свойств изделия и характеристик вариативности значений указанных параметров [1].

Поскольку сложные СУ функционируют в стационарных и нестационарных режимах при большом разнообразии воздействующих неконтролируемых, а зачастую и неизвестных факторов, то наиболее информативным их эмпирическим описанием представляются статистические данные, предшествующие деградационным изменениям, нарушающим нормальное функционирование СУ. Следует отметить, что число таких данных ограничено. Реальные состояния СУ могут быть неизоморфны значениям контролируемых параметров.

Для решения проблемы о состоянии СУ предлагается использовать метод моделирования ускоренных исследовательских испытаний светодиодных устройств. Математическая задача планирования эксперимента состоит в том, чтобы найти уравнение поверхности отклика:  $\eta = \eta(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , где  $\eta$  – функция отклика, т.е. параметр оптимизации;  $x_i$  – факторы, которые варьируются при проведении эксперимента. Таким образом, математическое планирование связано с изучением формы поверхности отклика; следовательно, оптимальному значению выхода соответствуют максимальные или минимальные точки этой поверхности. Для большинства реальных процессов вид поверхности отклика заранее неизвестен, поэтому при экспериментальном поиске оптимальных условий функцию  $\eta$  представляют в виде степенного ряда:

$$\eta = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_i x_i^2 \quad (1)$$

Точность подобной аппроксимации определяется порядком степенного ряда и

диапазоном изменения переменных. Поверхность отклика изучается обычно в сравнительно узком интервале варьирования факторов, поэтому без большой погрешности можно отбросить члены высших порядков. Задача оптимизации решается в два этапа. Сначала осуществляется поиск области оптимума – для чего применяется линейная модель поверхности отклика. Затем для описания почти стационарной (оптимальной) области используется степенной ряд, содержащий члены второго порядка, а иногда и третьего порядка. Коэффициенты степенного ряда (коэффициенты регрессии)  $a_i$  можно оценить с помощью коэффициентов регрессии, которые определяется по результатам конечного числа опытов. Тогда уравнение регрессии, получаемое на основании результатов экспериментов имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_i x_i^2, \quad (2)$$

где  $y$  – выборочная оценка функции отклика,  $b_i$ ,  $b_{ij}$  – коэффициенты регрессии. После вычисления коэффициентов регрессии нужно оценить влияние изучаемых факторов на функцию отклика и определить направление движения к области оптимума.

Известно, что деградация СУ главным образом обусловлена снижением излучательной способности светодиодного чипа в течение времени его эксплуатации. Кроме того, изменение интенсивности излучения происходит нелинейным образом [2]. Поэтому, для проведения оценки надежности СУ необходимо проводить анализ плана эксперимента основанного на построении нелинейной модели деградации интенсивности излучения светодиодных устройств. В качестве функции отклика от времени для полупроводниковых диодов используем функцию:

$$Y(B, t) = I - b_1 \exp(-b_2 t) \quad (3)$$

где  $Y(B, t)$  – показатель работоспособности;  $b_1, b_2$  – коэффициенты модели, являющиеся параметрами форсирующих режимов.

$$b = \varphi(A, x) \quad (4)$$

Здесь  $A$  – вектор коэффициентов, характеризующих влияние режимов. Как правило, зависимость (4) описывается моделями второго порядка, а  $\{a\}$  – коэффициенты регрессии, вычисляемые по методу наименьших квадратов (МНК) с помощью выражения

$$A = (X^* \cdot X)^{-1} \cdot X \cdot B \quad (5)$$

где  $X$  – матрица плана испытаний;  $B$  – вектор-столбец откликов, в качестве которых используются оценки коэффициентов моделей (3). Знаки «\*» и «-1» – транспонирования и обращения, соответственно.

Далее, используя полученные коэффициенты уравнения регрессии в качестве откликов, строится модель (2), включение которой в (3) и дает модель работоспособности при форсирующих значениях факторов эксплуатации СУ. В качестве максимального уровня снижения интенсивности излучения СУ брался стандарт LM-80 созданный Обществом Осветительной Техники Северной Америки (IESNA).

$$Y = I - A_1 x^* \exp(-A_2 x^* t), \quad (5)$$

где  $x^*$  – вектор форсирующих режимов, составленный согласно модели (4).

Для этого испытывают выборку в форсированном режиме в течение времени  $t_\phi$  до получения заданного уровня показателя работоспособности  $Y_T$ . Тогда, используя равенство

$$I - A_1 x_n^* \exp(-A_2 x_n^* t_n) = I - A_1 x_\phi^* \exp(-A_2 x_\phi^* t_\phi),$$

получаем выражение для определения времени наработки до значения  $Y_T$  в номинальном режиме  $x_n$

$$t_n = (\ln(A_1 x_n^* / A_1 x_\phi^*) + A_2 x_\phi^* t_\phi) / A_2 x_n^* \quad (6)$$

Оценка надежности светодиодов с малым телом свечения (СИД СМС), созданных на основе чипа ELC-645-29-20 фирмы EPiGAP Optoelectronic GmbH в корпусе KT-1-4.04НБ, группа №1 (20 шт.) и группа №2 (20 шт.) проводилась при температурах  $T_1 = 80^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 110^\circ\text{C}$ , ток нагрузки  $I_1 = 10\text{ мА}$  и  $I_2 = 15\text{ мА}$ , длительность наработки была – 1400 часов. В качестве форсирующих факторов были: повышенная температура окружающей среды  $T, ^\circ\text{C} \equiv x_1$  и повышенный прямой ток через диод  $I, \text{мА} \equiv x_2$ .

По результатам испытаний для каждой выборки с помощью МНК были построены модели вида (1) и определены значения коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$ . Используя полученные коэффициенты в качестве откликов, строим модели вида (2), которые с оцененными коэффициентами будут иметь следующий вид:

$$b_1 = 0,8683 - 0,0717 \cdot T - 0,1068 \cdot I - 0,0813 \cdot T \cdot I + 0,0176 \cdot T^2 - 0,03212 \cdot I^2;$$

$$b_2 = 10^{-3} \cdot (0,652 + 0,566 \cdot T + 0,654 \cdot I + 0,3562 \cdot T \cdot I + 0,004 \cdot T^2 + 0,201 \cdot I^2).$$

Включив эти модели в (3), получим модель для функции отклика.

1. Мишанов, Р.О. Исследовательские испытания интегральных микросхем / Р.О. Мишанов, М.Н. Пиганов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4(7). – С. 7–17.
2. Манего, С.А. Оценка надежности оптоэлектронных устройств / С.А. Манего, Ю.А. Бумай, Д.С. Бобученко, Ю.В. Трофимов // Приборостроение - 2014: материалы 7 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19-21 ноября 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 350–352.

УДК 681.785:681.7.068

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ксенофонтов М.А.<sup>1</sup>, Поляков А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ прикладных физических проблем БГУ  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

В условиях современных энергонасыщенных производств предъявление жестких требований к метрологическим параметрам электрических датчиков часто наталкивается на трудноразрешимые проблемы защиты их от различного рода электромагнитных помех, что особенно важно при значительном удалении датчиков от пунктов сбора информации. Поэтому оптические методы в области электрических измерений в энергетике и промышленности все чаще рассматриваются как перспективная альтернатива уже существующим электрическим, так как они обладают рядом преимуществ: более широкими полосой частот и динамическим диапазоном, хорошими диэлектрическими свойствами в сочетании с высокой пожарной безопасностью и коррозионной стойкостью и т.д. Это обуславливает актуальность задачи разработки новых методов регистрации и обработки оптических сигналов и построения волоконно-оптических измерительных систем, сочетающих в себе основные принципы надежности и дешевизны с многофункциональностью и высокой точностью измерений.

По своему назначению высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП) делятся на:

- Сверхдальние высоковольтные линии напряжением 500 кВ и выше (предназначены для связи отдельных энергосистем).
- Магистральные высоковольтные линии напряжением 220 и 330 кВ (предназначены для передачи энергии от мощных электростанций, а также для связи энергосистем и объединения электростанций внутри энергосистем – к примеру, соединяют электростанции с распределительными пунктами).
- Распределительные высоковольтные линии напряжением 35, 110 и 150 кВ (предназначены для электроснабжения предприятий и населенных пунктов крупных районов)
- Высоковольтные линии 20 кВ и ниже, подводящие электроэнергию к потребителям.

В связи с наибольшей распространенностью практический интерес представляют последние два класса ВЛЭП.

Волоконно-оптические датчики электрического напряжения в основном предназначены для удаленного контроля параметров высоковольтных линий электропередач и трансформаторных подстанций. Разработаны несколько типов оптических датчиков напряжения, основанных на электрооптическом эффекте [1, 2], яв-

лении электрострикции [3], а также с использованием пьезоэлектрических материалов [4,5]. Из всех перечисленных конструкций наиболее удачной по своим метрологическим характеристикам представляется волоконно-оптический датчик на основе интерферометра Маха-Цендера с использованием пьезоэлектрической трубки [5]. Однако на успешную работу таких датчиков влияет ряд факторов, связанных с интерферометрическими методами измерений, что ограничивает их широкое практическое применение. Во-первых, это ошибка измерений, возникающая из-за относительного изменения длин плеч интерферометра при флуктуациях температуры и давления. Во-вторых, необходимо постоянно контролировать поляризацию излучения, чтобы уменьшить связанное с этим затухание. В-третьих, по сравнению с многомодовыми волокнами используемые одномодовые волоконные световоды требуют более сложных устройств стыковки с другими оптоэлектронными компонентами и являются менее прочными. В-четвертых, наблюдается высокая чувствительность интерференционной картины к вибрациям и другим механическим воздействиям.

Улучшение эксплуатационных характеристик в волоконно-оптических датчиках связано с переходом от аналоговых измерений к использованию частотного метода измерений. Для контроля напряжения предлагается использовать волоконно-оптический датчик (ВОДН), принцип действия которого основан на регистрации изменения частоты рециркуляции одиночного импульса. Измерение электрического напряжения осуществляются на основе последовательного отслеживания изменения разности частот рециркуляции на соседних участках на соседних длинах волн:  $\Delta f_i(U) = f_{i-1}(\lambda_{i-1}) - f_i(\lambda_i)$ . Изменение частоты рециркуляции можно регистрировать с высокой точностью при относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции в пределах  $(2-6) \cdot 10^{-6}$  (в зависимости от длины волоконного световода) при времени измерения 1 с. Чувствительным элементом является пьезокерамическая трубка (ПЗТ), на которую намотан волоконный световод и жестко на ней зафиксированный с помощью эпоксидных смол. В качестве пьезоэлемента используется пьезокерамика – поликристаллические сегнетоэлектрические твердые растворы, подвергнутые после синтеза поляризации в постоянном электри-

ческом поле. Они обладают сильным пьезоэффектом, большой стабильностью, большой механической прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, сравнительной простотой и невысокой стоимостью изготовления. К ПЗТ прикладывается измеряемое напряжение. В данном устройстве используется обратный поперечный пьезоэффект, при котором приложенное к диску напряжение приводит к изменению его размеров, что влечет за собой изменение длины волоконного световода (ВС), его показателя преломления и, следовательно, частоты рециркуляции. В результате радиальных механических напряжений изменение радиуса диска  $\Delta r$  под влиянием приложенного напряжения  $U$  записывается следующим образом:  $\Delta r/r = 2\beta \frac{U}{h}$  [6], где  $\beta$  – пьезоэлектрическая постоянная,  $h$  – толщина диска.

Источником излучения является набор полупроводниковых инжекционных лазеров, генерирующих в диапазоне длин волн 1530–1610 нм и мощностью излучения 3–5 мВт. Далее излучение на различных длинах волн с помощью мультиплексора собирается в один световод и направляется к чувствительным элементам. В качестве чувствительного элемента используется пьезоэлектрическая трубка типа PZT-4. Выбор данного типа ПЗТ обусловлен его линейной характеристикой в широком диапазоне измеряемых напряжений и отсутствием петли гистерезиса. Диаметр диска выбирается согласно следующим условиям. Минимально допустимый радиус изгиба ВС определяется исходя из механических свойств волокна. Если волокно изогнуто столь сильно, что поверхностные напряжения превысят 0,2%, то весьма вероятно, что в процессе эксплуатации в нем могут возникнуть значительные трещины. Для того, чтобы этого не произошло, должно выполняться следующее условие:  $d > 500D_{ан} - 2h_1$ , где  $D_{вс}$  – диаметр оболочки ВС (125 мкм),  $h_1$  – толщина слоя защитного покрытия ( $h_1=62,5$  мкм, диаметр ВС вместе с полимерным покрытием 250 мкм), т.е.  $d > 6,2$  см ( $r > 3,1$  см). Для действующего значения переменного напряжения для PZT-4  $\beta = 1,3 \cdot 10^{-10}$  м/В, максимальная измеряемая напряженность электрического поля составляет  $E=14,4$  кВ/см, поэтому чтобы измерять напряжения, например, до 20 кВ, толщина диска должна быть не менее 1,5 см.

Спектральная селекция излучения осуществляется с помощью волоконных брэгговских решеток (ВБР) с различным периодом, при этом каждая решетка настроена на отражение определенной длины волны  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . Отраженная волна проходит через направленный ответвитель и усиливается волоконным эрбиевым усилителем (ВЭУ). ВЭУ позволяет одновременно усиливать излучение во всем рабочем спектральном диапазоне, при этом коэффициент усиления зависит от мощности входного сигнала. В связи с тем, что

при увеличении входного сигнала коэффициент усиления нелинейно падает, то на выходе ВЭУ нет необходимости применять аттенуаторы для ослабления отраженного сигнала от близлежащих секций. Если использовать волоконный эрбиевый усилитель со спектральной полосой усиления 35 нм и применять лазерные источники, излучающие на длинах волн, разнесенных на 200 ГГц (1,6 нм) в окрестностях длины волны 1550 нм, в этом случае с помощью разработанной схемы ВОДН можно организовать одновременный мониторинг до 10 электрических линий.

Сигналы на различных длинах волн с выхода ВЭУ пространственно разделяются с помощью оптического демультиплексора и поступают на фотоприемник. Фотоприемником являлся быстродействующий InGaAs лавинный фотодиод (ЛФД) Mutsubishi PD893D2 со спектральной полосой 1000–1600 нм, имевший при коэффициенте лавинного умножения  $M=10$ , сопротивлении нагрузки  $R_n=50$  Ом и  $\lambda=1300$  нм полосу частот 2,5 ГГц и чувствительность  $S_i=0,8$  А/Вт при  $M=1$ . Использование ЛФД позволяет не применять электронные усилители на их выходе и обеспечить необходимый уровень сигнала. Электрические сигналы с выхода ЛФД поступают на пороговые устройства (ПУ) с регулируемым порогом срабатывания, основу которого составляет компаратор Am685 и преобразователь уровня F100125. Уровень порога для каждого ПУ индивидуально задается блоком управления таким образом, чтобы с одной стороны, исключить срабатывание по шумам (минимизировать вероятность ложной тревоги), а с другой стороны – устойчиво срабатывать по уровню полезного сигнала (минимизировать вероятность пропуска сигнала). ПУ выдает стандартные по амплитуде и длительности электрические сигналы, который через блок управления поступают на блок регенерации (БР). БР формирует электрические импульсы требуемой амплитуды / формы / длительности, которые усиливаются модулятором тока (МТ) и поступают в виде импульсов тока накачки на полупроводниковые источники излучения. Таким образом, цикл рециркуляции замыкается. Блок обработки и отображения информации (БО) совместно с двухканальным частотомером (ЧМ) регистрирует частоту рециркуляции на каждой длине волны и изменение разности этих частот по соответствующему алгоритму преобразуется в измеряемое напряжение, которое фиксируется и отображается на мониторе.

Погрешность датчика, т. е. минимальное изменение измеряемой физической величины, которое может быть однозначно и достоверно зафиксировано, во многом определяется стабильностью частоты рециркуляции. Частота рециркуляции определяется следующим образом:

$$f = [T_3 + 2Ln/c]^{-1},$$

где  $L$  – длина секции ВС;  $n_0$  – показатель преломления сердцевины волокна ( $n=1,4655$ );  $T_3$  –

временная задержка распространения импульса в других элементах контура.

Именно флуктуации  $T_3$  и определяют величину нестабильности частоты рециркуляции. Наиболее существенное влияние на изменение  $f$  оказывают следующие факторы: временной джиттер в инжекционном лазере, возникающий из-за случайных изменений времени задержки между импульсом тока накачки и излучением лазера; нестабильность времени отклика лавинного фотодиода; временной разброс моментов срабатывания порогового устройства, который связан как с изменением амплитуды входного сигнала, так и с флуктуациями самого порога срабатывания. Из приведенных в [7] результатов исследований стабильности частоты рециркуляции следует, что для минимизации влияния перечисленных факторов необходимо выполнять следующие условия. Для уменьшения временного джиттера в ИЛ нужно, чтобы в процессе протекания тока накачки происходило минимальное нагревание активной области лазера, т.е. длительность импульса тока накачки не должна превышать 10 нс. Наименьшее значение нестабильности времени распространения сигнала в контуре достигается при коэффициенте лавинного умножения ЛФД  $M \approx 10$ , когда отношение сигнал/шум близко к максимальному значению [8]. Показано [9], что при комнатной температуре для анализируемой системы оптимальный коэффициент лавинного умножения для таких ЛФД лежит в пределах 8–12 и практически не зависит от мощности излучения ИЛ или длины ВС. Увеличение тока постоянного смещения  $I_0$  ведет к уменьшению амплитудных флуктуаций интенсивности излучения и минимизирует временной джиттер ИЛ. Данный эффект будет наблюдаться до  $I_0=0,9-0,95 I_{th}$ , далее в предпороговом режиме излучение лазера становится нестабильным. Во всех случаях минимальные флуктуации наблюдались, когда величина порога блока регенерации соответствовала линейному участку фронта импульса. При этом, чем больше крутизна этого участка, тем в меньшей степени на величину

флуктуаций  $T_3$  будут влиять случайные изменения порогового напряжения. Поэтому с учетом пусть и незначительной временной дисперсии ВС значение переднего фронта импульса тока накачки ИЛ должно быть 10 нс и менее. В этом случае величина  $T_3$  оценивается в пределах 50–60 нс.

Показано, что зависимость изменения частоты рециркуляции от приложенного измеряемого электрического напряжения носит линейный характер, и чувствительность метода для ПЗТ радиусом 12 см составляет 4,2 Гц/кВ. Установлено, что с точки зрения достижения минимальной погрешности измерений чувствительные элементы следует располагать в порядке возрастания максимальных действующих напряжений в измеряемых линиях и в зависимости от радиуса и толщины ПЗТ, длины волоконной секции, не подвергающейся деформации, относительная методическая погрешность составляет 0,8–1,2% в диапазоне напряжений от 20 кВ до 150 кВ.

1. Optically controlled fiber voltage sensor / V. N. Filipov [et. al] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2000. – Vol. 12, № 7. – P. 870 – 872.
2. An optical AC voltage sensor based on the transverse pockels effect / Pan Feng [et. al] // Sensors.–2011. – № 11. – P. 6593 – 6602.
3. Bohnert K. Fiber-optic sensing of voltages by line interrogation of the electric field / K. Bohnert, J. Nehring // Opt. Lett. – 1989. – Vol. 14, № 5. – P. 290–292.
4. Bohnert K. Fiber-optic voltage sensor for 420 kV electric power systems / K. Bohnert, J. Kostovic, and P. Pequignot // Opt. Eng. – 2000.– Vol. 39. –P. 3060–3067.
5. Frequency-output fiber-optic voltage sensor for high-voltage lines / L. Martinez-leon [et. al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2001. – Vol. 13, № 9. – P. 996–998.
6. Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg grating high-voltage sensor / M. Pacheco [et. al] // Meas. Sci. Technol. – 1999. – P. 777 – 782.
7. Поляков, А.В. Стабильность частоты рециркуляции в кольцевых структурах с волоконно-оптической линией задержки / А.В. Поляков, С.И. Чубаров // Изв. вузов. Приборостроение.– 2003.–Т.46, №5.– С.49 – 55.
8. Поляков, А.В. Температурная зависимость шумовых характеристик оптоволоконных информационно-измерительных систем / А.В. Поляков // Изв. вузов. Приборостроение.– 2006.– Т. 49, № 8.– С. 33 – 37.
9. Ксенофонов, М.А. Стабильность частоты рециркуляции в замкнутых оптоэлектронных системах регенеративного типа / М.А. Ксенофонов, А.В. Поляков // Электроника-инфо. – 2010. – №5. – С.76 – 80.

УДК 535.2:616-71

## НЕИНВАЗИВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ГЛЮКОМЕТР С ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ

Куприй А.И., Безуглый М.А.

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

*Киев, Украина*

Проблема сахарного диабета очень остро стоит в современном обществе, а значит есть необходимость в создании приборов для контроля глюкозы. Большинство современных приборов используют инвазивный принцип диагностики, но для удобства возможно создание устройств, в

основу работы которых положено неинвазивный метод определения концентрации.

На сегодняшний день существуют такие типы глюкометров:

– фотометрические; уровень глюкозы в крови человека определяется в зависимости от

окраски тест-зоны. Окраска возникает как реакция глюкозы и специального вещества, которое нанесено на полоску. Технология этих приборов, разработанных достаточно давно, уже устарела.

– электромеханические; показатель уровня сахара измеряется величиной тока. Она появляется при взаимодействии глюкозы и специальных веществ в тест-полосках. Это новые поколения приборов, показания глюкометра этого типа будут немного точнее, чем предыдущего. Эти приборы подвержены минимальному воздействию внешних факторов. Обычно в таких приборах идет калибровка по плазме.

Методы определения глюкозы достаточно разнообразны: Методы «мокрой» биохимии, реализованные на автоматических биохимических анализаторах, обеспечивают нужды лабораторий с большим потоком анализов. Анализаторы глюкозы типа «Biosen» требуют от оператора минимальных трудозатрат, так как они полностью автоматизированы и достаточно производительны (скорость от 50 до 200 проб в час). Для лабораторий с небольшим числом исследований, а также экспресс-лабораторий удобен специализированный биохимический фотометр «Микролаб 540». Для бригад скорой помощи, пациентов с диабетом идеальное решение – глюкометры типа «OneTouch». Таким образом задача обеспечить не только быстрое, но и высокоточное определение глюкозы, на сегодняшний день вполне решаема. Но в то же время измерение таким путем требует больших затрат, так как тест-полоски, необходимые больному ежедневно, будут стоить около \$200 в год, т.е. ежегодные расходы пациентов с диабетом, которые требуют нескольких измерений за день (пожилые люди и дети и т.д.) будут гораздо выше.

Оптические методы неинвазивной диагностики предполагают использование оптического (в том числе лазерного) излучения для зондирования тканей и органов пациента с целью получения по отраженному (рассеянному) или прошедшему сквозь ткань свету диагностической информации о биохимическом составе и морфологическом строении обследуемого участка мягких тканей тела пациента. Величина регистрируемого при этом сигнала зависит как от коэффициента поглощения, так и от коэффициента рассеяния света перфузированной кровью ткани. Основной вклад в поглощение определяется водой (H<sub>2</sub>O), протеином, липидами, различными формами гемоглобина (в частности, окси-, дезокси-гемоглобином), меланином в коже, а также глюкозой. Пропускание света на каждой длине волны является функцией толщины, цвета и структуры кожи, кости, крови и других материалов, через которые проходит свет[1].

Наиболее используемыми оптическими методами в неинвазивной диагностике наличия

сахара в крови являются рамановская спектроскопия (комбинационное рассеяние света) и спектроскопия ближней инфракрасной области. Также существуют спектроскопия средней и дальней инфракрасной области, терагерцовая спектроскопия, а также оптоакустические методы контроля уровня сахара с крови [2].

Основным методом для создания предложенного прототипа глюкометра выбрана раман спектроскопия. Раман спектроскопия – это техника, которая может быть использована для анализа широкого спектра образцов. Это решает большинство ограничений других спектроскопических методов. Его можно использовать как для качественного, так и для количественного анализа. Цель Раман-спектроскопии – это техника рассеивания. Она основана на рамановском эффекте, то есть изменении длины волны, которая оказывается некоторой частью излучения, рассеянного в среде. Этот эффект специфичен для молекул, которые его вызывают, и могут использоваться в спектроскопическом анализе. Рамановские спектры содержат информацию об изменении уровней молекулярной энергии под влиянием излучения лазерного света и последующее выявление света, рассеивается с мутной пробы на различных длинах волн, отличных от длины волны лазерного возбуждения [3].

Раман-спектроскопия используется для неинвазивного мониторинга глюкозы в крови и является наиболее перспективным методом благодаря высокой химической стабильности, глубине проникновения, а также количества разработанных методов количественного анализа данных. Рамановские спектры содержат информацию об изменении энергетических уровней молекулы под воздействием лазерного излучения света. Разница в длине волны зависит от удельной энергии химических связей. Это дает набор характеристических пиков в спектре, который является «отражением» этого специфического химического вещества [4].

На основе рассмотренных выше методов, в частности по спектроскопии комбинационного рассеяния, разработано техническое решение устройства для определения концентрации глюкозы в крови с использованием принципов фотометрии эллипсоидальными отражателями [5, 6]. Функциональная схема неинвазивного глюкометра показана на рис.1.

Принцип работы схемы следующий: ЛД выпускает луч, который проходит через ОС, которая формирует необходимое пространственное распределение лучистости на БО. После попадания пучка лазерного излучения на БО, часть его отражается, а часть проходит. Полученные пучки собираются с помощью ЭР и попадают на ФД. Эллипсоидальные рефлекторы используются в данном приборе для того, чтобы собрать как можно

больше света и соответственно получить больше полезной информации. Информация на выходе ФД поступает на МК, который обрабатывает выходной сигнал с приемников, и переводит его в значение концентрации глюкозы в крови, которое выводится на ЖК.

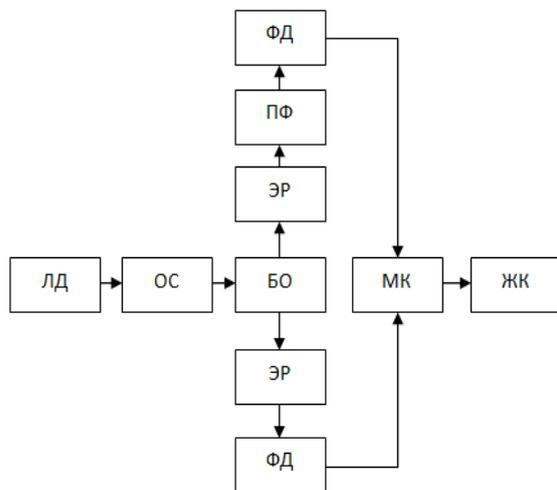


Рисунок 1 – Функциональная схема неинвазивного глюкометра с эллипсоидальными рефлекторами: ЛД- лазерный диод; ОС- оптическая система; БО – биологический объект; ЭР – эллипсоидальный рефлектор; ПФ – полосовой оптический фильтр; ФД – фотодетектор; МК – микроконтроллер; ЖК – жидко кристаллический дисплей

Использование данного метода в совокупности с предложенной технологией дает возможность получения нового прибора для контроля уровня глюкозы в крови пациента, прототипом создания которого занимается авторский коллектив.

1. Мезенцева М. А. Неинвазивные методы измерения сахара в крови / М. А. Мезенцева, Т. А. Букрина // Информационно-измерительная техника и технологии : материалы VI научно-практической конференции, Томск, 27-30 мая 2015 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – [С. 77-82].
2. Kuprii, A. I. To the non-invasive optical control of glucose level / A. I. Kuprii // Новые направления развития приборостроения : материалы 10-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 26–28 апреля 2017 г. : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; ред. кол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 165.
3. Akshara Subramanian. Non Invasive Glucose Measurement Using Raman Spectroscopy / Akshara Subramanian, Shreya Adap, Shruti Chawale, Sonali Singh, Prathibha Sudhakaran // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). - Volume: 04 Issue: 03. - Mar -2017
4. Wróbel M.S. Non-invasive blood glucose monitoring with Raman spectroscopy: prospects for device miniaturization / M. S. Wróbel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.- 2016.- Vol. 104.
5. Bezuglyi, M.A., Botvinovskii, D.V., Zubarev V.V., Kotsur Y.A., "Method of photometric mirror ellipsoid of revolution for research of roughness of surface," Methods and devices of control of quality, 27, 77-83 (2011).
6. Безуглый М.А. Обработка изображений при эллипсоидальной фотометрии / Безуглый М.А., Безуглая Н.В., Самиляк А.Б. // Приборы и методы измерений. 2016; 7 (1). – С. 67-76.

УДК 535.317

## ПАССИВНАЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВИЗОРА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Муравьев А. В.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
Киев, Украина*

Медицинское тепловидение является бесконтактным, быстрым и неинвазивным средством диагностики многих известных заболеваний. Метод позволяет наблюдать в динамике и контролировать эффективность лечения, заживление ран на различных стадиях морфогенеза, а также предупредить возможное развитие осложнений. Использование термографа является высокоэффективным и информативным средством обследования пациентов для выявления воспалительных процессов, особенно на этапе отсутствия специфических клинико-лабораторных данных, что подтверждает его диагностические возможности и целесообразность использования на ранних стадиях заболевания. Это открывает широкие перспективы для применения термографии в качестве метода функциональной и скрининг-диагностики. Термограммы, сделанные с помощью различных тепловизоров, являются унифицированными, отличаются фактически только размерами и качеством изображения и

могут использоваться одновременно для выявления различных патологий. На сегодняшний день разработаны критерии тепловизионной диагностики для более чем двухсот заболеваний и патологических состояний и этот список постоянно пополняется.

Термография с каждым днем получает все более широкое применение в многопрофильных медицинских учреждениях. Работа врача-термографиста при скрининг-диагностике проходит, как правило, в нестабильных условиях окружающей среды. Это обуславливает требования к наличию у него высокой квалификации и способности учитывать влияние внешних факторов, а также незавершенную термоадаптацию пациентов в процессе диагностики. Поэтому одним из актуальных вопросов остается повышение информативности и соответствия снятых показателей реальной температуре участка поверхности объекта наблюдения. Стоит отметить, что адекватность диагностики также зависит от правильности интерпретации термограмм, которая, в

свою очередь, возможна только при получении четкого изображения с высоким качеством. Вышеперечисленные параметры в значительной степени зависят от условий эксплуатации и влияния факторов окружающей среды на конструкцию термографа.

Известно, что различные части тела человека имеют индивидуальную нормальную среднюю температуру, обусловленную существованием особенностей в степени их кровоснабжения и иннервации, однако поверхностная температура симметричных участков одних и тех же областей в норме достоверно не отличается. Поэтому в качестве контрольного участка для выявления патологий следует использовать противоположно симметричную область тела.

При анализе результатов полученных термограмм и постановке диагноза существуют определенные правила и закономерности. Например, зарегистрированная разница в 1-2 °С на противоположно симметричных участках тела свидетельствует о наличии патологии организма. В частности, при новообразованиях изменение температуры в большую сторону указывает на злокачественное перерождение, а в меньшую – на доброкачественную природу опухоли.

На сегодняшний день термографическая диагностика применяется в различных направлениях медицины: онкологии, маммологии, оториноларингологии, кардиохирургии, при судебно-медицинской экспертизе. Одной из важнейших проблем при кардиохирургических вмешательствах является ишемическое повреждение миокарда, поскольку из-за пережатия аорты отсутствует нормальная коронарная перфузия. Для полного контроля над температурным распределением перспективным и инновационным является использование термографов, позволяющих получить высокоинформативное изображение температурного распределения на всей поверхности сердца.

Колебания температуры на поверхности миокарда в исследуемой области четко определяются при гипотермии и гипертермии в условиях искусственного кровообращения. Точный контроль температуры охлаждения и нагрева тканей мозга и сердца позволяет минимизировать время проведения искусственного кровообращения и обеспечить максимальную защиту миокарда во время операции.

Снижение температуры сердца и мозга с +36 °С до +18 °С является главным фактором защиты от гипоксического поражения мозга при выключении этих органов из кровообращения при операциях на открытом сердце. Во время согревания на начальном этапе температурная разница между теплоносителем и телом не должна превышать 5 °С. На других этапах согревания больного до 36 °С температурный градиент не должен превышать 8 °С, а

температура теплоносителя должна строго выдерживаться в диапазоне 39,0–39,5 °С [2]. Следовательно, при операциях такого рода необходим высокоточный контроль температур, как теплоносителя, так и пациента.

В тепловизорах используются два диапазона длин волн оптического спектра, которые соответствуют окнам прозрачности атмосферы: 3-5 мкм или 8–14 мкм. Однако для медицинских термографов выбор спектрального диапазона не обусловлен исключительно требованиями прозрачности атмосферы, поскольку объект измерения (человек) находится близко к камере и уровень поглощения ИК излучения воздухом менее существенен. Вместе с тем выявлено, что термографы, работающие в спектральном диапазоне 3–5 мкм, более чувствительны к рефлексам засветки кожи от внешних источников тепловых излучений. Учитывая, что максимум спектральной интенсивности излучения тела человека с температурой 37 °С составляет примерно 9,3 мкм, а влияние паразитных фонов менее существенным в диапазоне 8–14 мкм, при проектировании фотоприемных узлов медицинских тепловизоров стоит ориентироваться именно на этот спектральный диапазон.

Термооптический анализ одной из типичных схем инфракрасных (ИК) объективов тепловизора [3] показал, что при повышении температуры в оптической системе с фокусным расстоянием 57,55 мм на 40 °С (при условии однородного температурного распределения) изменение заднего фокального отрезка составляет более 200 мкм. Максимальная величина терморасфокусировки наблюдается в объективах, все компоненты которых изготовлены из германия, характеризующегося высоким значением термооптической постоянной. В результате изменения величины заднего фокального отрезка, в плоскости фотоприемного устройства диаметр кружка рассеяния увеличивается в 8 раз. Как следствие, нарушаются требования к контрасту изображения и концентрации энергии в размере пикселя. Контрастность изображения характеризуется модуляционной передаточной функцией, значение которой на пространственной частоте Найквиста  $\mu_n = 20 \text{ мм}^{-1}$  для матричного приемника излучения с размером пикселя  $25 \times 25 \text{ мкм}$  на краю поля зрения объектива уменьшается на 40 % для сагиттальной и на 25% для меридиональной плоскости при изменении температуры в ИК объективе на 40 °С. Вышеуказанные факторы обуславливают резкое снижение частотных и энергетических характеристик оптической системы и существенное ухудшение качества изображения тепловизора. Следовательно, температурная зависимость характеристик материалов объектива существенно влияет на качество получаемого изображения, что, в свою очередь, снижает информативность и

адекватность оценки патологических состояний по термограммам даже при незначительных изменениях температурного поля в оптической системе прибора.

В процессе синтеза диоптрических объективов, состоящих из нескольких компонентов, существует возможность подбора материалов с целью самоатермализации системы. При этом есть возможность одновременно выполнить ахроматизацию оптической системы и минимизировать те aberrации изображения, на которые накладываются наиболее высокие требования. Для реализации вышеперечисленных задач, а именно термостабилизации и улучшения характеристик объектива термографа, на этапе расчета конструктивных параметров оптической системы прибора целесообразно воспользоваться пассивной оптической атермализацией. Алгоритм метода предусматривает использование при проектировании объектива нескольких ИК материалов с различными по величине и знакам термооптическими постоянными в сочетании с определенным материалом несущей конструкции узла [4].

Синтезированные на основе метода пассивной оптической атермализации ИК объективы с термостабилизированной величиной заднего фокального отрезка системы, такие как [5], сохраняют стабильность частотных и энергетических характеристик и обладают высоким качеством изображения в диапазоне температур эксплуатации.

1. Иваницкий Г. Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине / Г. Р. Иваницкий // Успехи физических наук. – 2006. – №12. – С. 1294-1320.
2. Муравьев А. В. Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа / А. В. Муравьев, А. Е. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2016. – вип. №4. – С. 195-198.
3. Сокольский М. Н. Светосильный объектив для инфракрасной области спектра / М. Н. Сокольский, И. Е. Совз // Патент России № 2449327. – 2010.
4. Тягур В. М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / В. М. Тягур, О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев // Оптический журнал. – 2014. – том 81. – № 4. – С. 42-47.
5. Муравйов О. В. Атермалізований інфрачервоний трілінзовий об'єктив / О. В. Муравйов, О. О. Назарчук // Патент України № 115796. – 2017.

УДК 535.37

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ЦВЕТОКОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВКИ СОЛЕЙ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ РАСТВОРОВ КРАСИТЕЛЕЙ

Попечиц В.И.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь*

Жидкие и твердые растворы органических красителей обладают интенсивными полосами поглощения в оптической области спектра электромагнитных волн, что делает их перспективными для применения в качестве визуализаторов рентгеновского и гамма излучений [1, 2].

При воздействии ионизирующего излучения на растворы красителей происходит необратимое обесцвечивание растворов, вызванное изменением состава и структуры молекул красителей в результате взаимодействия последних с кислород содержащими радикалами и ион-радикалами, образующимися в растворах вследствие радиолиза растворителей [3–5].

Многокомпонентные растворы органических красителей под воздействием ионизирующего излучения могут изменять цвет, что позволяет визуально определить величину воздействующей на радиационной дозы, используя для этого предварительно построенную цветовую градуировочную шкалу [5–9].

Для использования красителей в составе многокомпонентного раствора, применяемого в

качестве дозиметра ионизирующего излучения, необходимо, чтобы красители в данном растворе имели интенсивные электронно-колебательные полосы поглощения в видимой области спектра, хорошо растворялись в выбранном растворителе, химически не взаимодействовали друг с другом и с образующимися продуктами радиационной деструкции красителей, имели существенно различающиеся скорости деструкции (в этом случае изменение цвета раствора будут наиболее чувствительным к изменению величины радиационной дозы, воздействовавшей на раствор) [6, 7].

В данной работе изучены процессы, происходящие в многокомпонентных водных растворах органических красителей различных классов, содержащих добавки солей серной кислоты ( $MnSO_4$ ,  $FeSO_4$ ,  $CuSO_4$ ,  $(NH_4)_2SO_4$  и др.), при облучении растворов рентгеновским излучением.

Для исследования влияния добавок солей серной кислоты на спектральные и цветоконтрастные характеристики облученных рентгеном растворов были приготовлены водные растворы, содержащие два красителя (один краситель поглощал свет в длинноволновой области

видимого спектра, другой – в коротковолновой). Максимальная оптическая плотность таких трехкомпонентных растворов в видимой области спектра составляла 2,1. Затем в полученный трехкомпонентный раствор объемом 15 мл добавлялись 5 мл воды или 5 мл водного раствора соли серной кислоты концентрации 1 моль/л, соответственно.

Многокомпонентные растворы красителей, содержащие и не содержащие добавки солей серной кислоты, в пластмассовых кюветках облучались на рентгеновском дифрактометре «Дрон 2М» при мощности тока, проходящего через рентгеновскую трубку 200 Вт (напряжение на рентгеновской трубке составляло 20 кВ, электрический ток в рентгеновской трубке – 10 мА). Время облучения составляло 20 минут. При этом соблюдался одинаковый способ установки кювет, для того, чтобы обеспечивать одинаковые условия облучения каждого раствора. Расстояние от рентгеновской трубки до облучаемых образцов составляло 15 см. Затем на спектрофотометре РВ 1251 «Solag» записывались спектры поглощения не облученных и облученных растворов в спектральном диапазоне 350–750 нм.

Сначала была исследована химическая стойкость двухкомпонентных водных растворов исследуемых красителей, перспективных для использования в качестве компонентов визуализаторов ионизирующих излучений. Концентрация растворов красителей составляла  $3,5 \cdot 10^{-5}$  моль/л. К 15 мл водного раствора красителя данной концентрации добавлялось 10 мл раствора соли серной кислоты концентрации 1 моль/л. Спектры поглощения растворов красителей, содержащих добавки солей серной кислоты, записывались через определенные промежутки времени. Чтобы исключить фотохимическую деструкцию красителей, растворы хранились в полной темноте, при комнатной температуре.

Измерения спектров поглощения водных растворов красителей, содержащих добавки солей серной кислоты, от времени хранения показали, что данные растворы, в отличие от растворов, содержащих добавки серной кислоты, обладают высокой химической стойкостью. За время хранения (до 350 часов) оптическая плотность растворов в максимуме длинноволновой полосы поглощения уменьшилась не более чем на 5 %.

В качестве примера на рисунке 1 представлены нормированные спектры поглощения не облученного водного раствора красителей кислотный алый ( $\lambda_{\max} = 530$  нм) + метиленовый голубой ( $\lambda_{\max} = 680$  нм) (кривая 1) и облученного рентгеном этого трехкомпонентного раствора, не содержащего добавки (кривая 2) и содержащего добавки соли  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (кривая 3). Из рисунка видно, что скорость радиационной деструкции красителей в

растворах, содержащих добавку соли серной кислоты, возрастает. Это можно объяснить присутствием в растворе анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , которые при радиолитическом разложении раствора образуют кислородсодержащие радикалы и ион-радикалы, обладающие высокой химической активностью. Взаимодействие последних с молекулами красителей приводит к нарушению  $\pi$ -электронной цепи сопряжения и смещению полос поглощения этих продуктов реакции в УФ-область спектра, что способствует уменьшению интенсивности длинноволновых полос поглощения растворов в видимой области спектра.

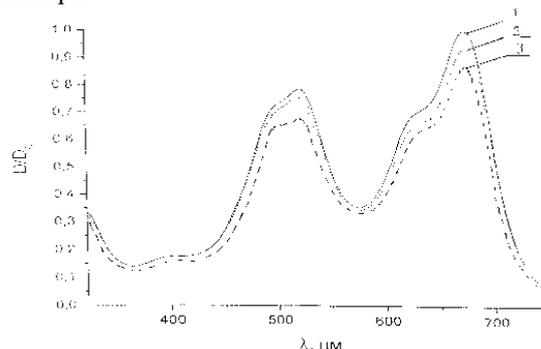


Рисунок 1 – Нормированные спектры поглощения ( $D/D_0$ ) водного раствора кислотный алый + метиленовый голубой: до облучения рентгеном (1), после облучения рентгеном (2), после облучения рентгеном с добавлением  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (3)

Похожие зависимости скорости радиационной деструкции органических красителей в многокомпонентных растворах, содержащих добавку солей серной кислоты, наблюдались и для других трехкомпонентных водных растворов красителей. При указанной концентрации солей серной кислоты, добавляемых в трехкомпонентные растворы разных красителей, увеличение скорости радиационной деструкции красителей составляло  $1 \pm 15$  %.

Полученные экспериментальные данные позволили сделать вывод о том, что скорость необратимой радиационной деструкции красителей в водных растворах возрастает при добавлении в растворы солей серной кислоты. Причем это возрастание скорости радиационной деструкции зависит от химической природы красителя. Следовательно, подбором красителей и добавлением в растворы солей серной кислоты можно улучшить цвето-контрастные характеристики облученных растворов, что важно при применении многокомпонентных растворов красителей в качестве дозиметров рентгеновского излучения.

1. Степанов, Б.И. Введение в химию и технологию органических красителей / Б.И.Степанов. – М.: Химия, 1977. – 448 с.
2. Бахшиев, Н. Г. Введение в молекулярную спектроскопию / Н.Г.Бахшиев. – Л.: Изд-во. ЛГУ, 1987. – 215 с.
3. Попечиц, В. И. Спектрально-люминесцентные характеристики гамма-облученных растворов трикарбонаниновых красителей / В.И.Попечиц // Вестник БГУ, сер. 1. – 2002. – № 3. – С. 33–37.
4. Попечиц, В.И. Спектроскопическое исследование

- радиационной устойчивости растворов красителей // Спектроскопия и люминесценция молекулярных систем / БГУ, НАН Беларуси; под ред. Е.С.Воропая, К.Н.Соловьева, Д.С.Умрейко. Минск: БГУ, 2002. С. 275 – 286.
5. Попечиц, В.И. Влияние гамма-облучения на спектры поглощения растворов кислотных красителей / В.И.Попечиц // Журнал прикладной спектроскопии. – 2003. – Т. 70, № 1. – С. 34 – 37.
  6. Попечиц, В. И. Визуализаторы ионизирующего излучения на основе многокомпонентных растворов красителей / В.И.Попечиц // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. – Минск, 2012. Ч. 2. С. 128 – 133.
  7. Попечиц, В. И. Дефектоскопия материалов и изделий с помощью многокомпонентных растворов красителей / В.И.Попечиц // Достижения физики неразрушающего контроля: сборник научных трудов Междунар. научно-технической конф., посвященной 50-летию Института прикладной физики НАН Беларуси / Институт прикладной физики. – Минск, 2013. – С. 284–289.
  8. Попечиц, В. И. Визуализаторы ионизирующего излучения на основе многокомпонентных растворов красителей / В.И.Попечиц // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы Междунар. науч.-технич. конф. (Могилев, 24-25 апр. 2014). Могилев, 2014. – С. 147–148.
  9. Попечиц, В. И. Влияние пероксида водорода на цветостойкость растворов органических красителей / В.И.Попечиц // Вестник БГУ, сер. 1. – 2015. – № 1. – С. 17–21.

УДК 624.94

## МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА НАКОПИТЕЛЬНОГО СУММИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ СВЕТОДИОДОВ С БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДЬЮ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Сернов С.П., Балохонов Д.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Ввиду постоянного совершенствования светодиодов, изготавливаемых по технологии OLED с применением квантовых точек и увеличения их времени наработки до отказа (ведущая американская фирмы по изготовлению светодиодов с квантовыми точками Quantum Materials Corp выпускает продукцию, у которой это время составило не менее 1000 часов [1]), все более актуальным является улучшение методов расчета деталей вторичной оптики для учета большой излучающей поверхности данных светодиодов.

Выдвинутые ранее рекомендации о конструировании деталей вторичной оптики, пригодных для различных типов светодиодов [2] позволяют модифицировать метод накопительного суммирования световых потоков таким образом, чтобы можно было рассчитывать детали вторичной оптики даже для светодиодов с очень большой площадью излучающей поверхности (круг диаметром до 20 мм).

Кроме условия квазиточечности и условия охвата источника света, для расчета детали вторичной оптики по модифицированному методу накопительного суммирования световых потоков необходимо учесть различный угол преломления у граничных лучей: те лучи, которые находятся ближе к оптической оси, преломляются слабее, чем те, которые находятся дальше от оптической оси. Из-за этого даже при правильном разбиении светового потока от неточечного источника появятся скачки силы света в произвольных направлениях.

Чтобы избежать появления этих скачков, угловой интервал для засветки определенной части заданного распределения силы света можно дополнительно разделить на несколько участков и рассеять их по всему участку.

При расчете деталей вторичной оптики для неточечных источников света в центральной части детали вторичной оптики рассеяние света, вызванное неточечностью источника света, будет больше, чем на периферии детали, так что при разбиении светового потока светодиода нужно учесть, что центр детали вторичной оптики будет обеспечивать засветку всего заданного распределения силы света.

В то же время периферическая область детали вторичной оптики, которая работает в основном по принципу полного внутреннего отражения, из-за малого рассеяния света может быть использована для тонкой настройки распределения силы света источника с деталью вторичной оптики.

Чтобы рассчитать габаритные размеры детали вторичной оптики для светодиодов, которые нельзя считать точечными источниками света, предлагается использовать не некоторое произвольное значение рассеяния света в центральной области, а краевые углы заданного распределения силы света. Это позволяет, не выходя за габариты по толщине детали вторичной оптики, путем использования ее внутренней поверхности улучшить равномерность детали, что уменьшает ее массу и увеличивает технологичность. Кроме того, это позволяет снизить потери на пропускание за счет малой толщины материала детали вторичной оптики.

Модифицированный метод накопительного суммирования световых потоков поощряет использование внутренней поверхности детали вторичной оптики, так как при его использовании нет необходимости обеспечивать плотный контакт излучающей поверхности источника и детали. Из-за этого внешняя поверхность детали вторичной оптики может быть выполнена гладкой (кусочно-

гладкой), что позволяет использовать деталь вторичной оптики как крышку, защищающую источник света от загрязнений и других воздействий окружающей среды. Таким образом, детали вторичной оптики с гладкой внешней поверхностью хорошо подходят для применения в модулях несменных источников света, которые кроме источника света содержат еще и схему питания, которую можно также разместить в пространстве под деталью. Используя модифицированный метод накопительного суммирования световых потоков, была определена теоретическая форма детали вторичной оптики для реализации распределения силы света стоп-сигнала. Компьютерное моделирование работы данной детали вторичной оптики с источниками света различных размеров показало, что даже в случае применения источника света большего размера, чем расчетный, при заданном световом потоке источника света деталь продолжает создавать распределение силы света, удовлетворяющее критериям соответствующего стандарта (Правила ЕЭК ООН №7), что отражено на рисунке 1.

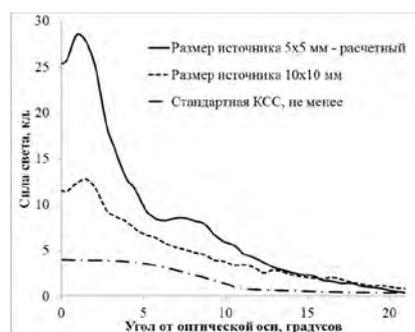


Рисунок 1 – Кривые силы света (КСС) для источников различного размер

1. 1000 Hour Quantum Dot LED Milestone Surpassed by Quantum Materials Corp // LED Professional Review [Electronic resource].-2017.-Mode of access: <https://www.led-professional.com/technology/light-generation/1000-hour-quantum-dot-led-milestone-surpassed-by-quantum-materials-corp> . - Date of access: 13.09.2017
2. Сернов С.П., Балохонов Д.В. Детали вторичной оптики адаптивных оптических систем транспортных средств с возможностью использования различных светодиодов // Приборостроение-2016: материалы 9-й МНТК, Минск, 23-25 ноября 2016 г. / редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2016. – с 122

UDC 004.514

## HARDWARE AND SOFTWARE FOR REMOTE CONTROL AND MONITORING OF LABORATORY STAND FOR THE OPERATION RESEARCH OF SOLAR PANELS

Slabinoha M.O., Klochko N.B., Kuchirka Y.M.

*Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Modern trends in higher education promote the widespread use of distance learning methods for both: students of external education and for self-studying of full-time students. Undoubtedly, the use of such tools and techniques makes it easier for students to access educational materials. However, for many specialties that have their own learning process specifics this way of presenting information, demos and handouts creates a number of limitations. In particular, for students of technical specialties it is very important to work with real stands during laboratory works. Therefore, the problem is to develop laboratory facilities that allow remote experiments to be done by managing and monitoring the results of experiments using network technologies, especially the Internet.

The prototype of the laboratory stand on the research of solar panels work was developed at the department of information and measuring technologies of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Photo of the prototype is shown in Fig. 1.

The prototype consists of a solar panel mounted on a rack, positioned in the horizontal and vertical plane by two servo-drives SG-90. Servo drives are controlled by Arduino UNO microprocessor board. The solar panel output contacts are connected to the relay, which feeds the current panel to the input of one

of the two AD620 operational amplifiers. This operation is repeated every three seconds. The first amplifier is used to stabilize the voltage generated by the panel. The second amplifier is used to amplify the voltage falling on the resistor of a given resistance value (in this case, 10 kOhm). The signals from the outputs of both operational amplifiers are fed to the Arduino UNO board's analog inputs. Thus, the voltage and current strength produced by the panel are obtained with the Arduino Uno.

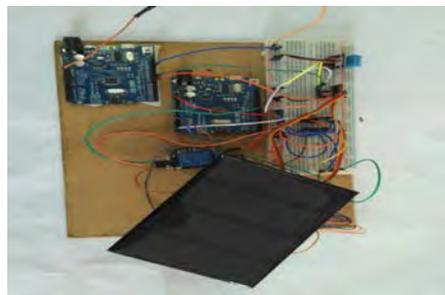


Figure 1 - Prototype of a laboratory stand for the operation research of solar panels

In addition to the data on the produced voltage and current at Arduino UNO, the DHT-11 sensor receives information about the temperature and humidity of

the indoor environment. The data is obtained from microprocessor board to operator's PC through a serial interface, the physical connection of which is provided by a USB cable [1].

To provide remote control of the prototype of the laboratory stand, there was decided to implement a computer system, the scheme of which is given in Fig. 2.

In this implementation, unlike the previously developed, where we used PC, we can use a pre-configured system unit with Internet access and SSH access without standard I/O devices. This means that the given node in the scheme can even be implemented on a single-board computer such as Raspberry Pi. The main requirements for the node are the ability to connect to the network, two USB ports for connecting microprocessor boards, and installed Python programming language interpreter, which implements the software of the given node.

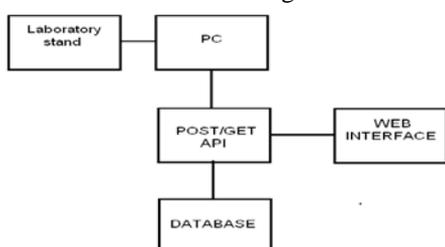


Figure 2 – Scheme of the computer system which provides remote control and monitoring of laboratory stand

The developed software consists of two independent scripts. The first script establishes a connection to the microprocessor board that controls the positioning of the solar panel. After that the script repeatedly sends a GET request to the specified web address in order to get the current position of the panel, specified by the user. If there is a need the control panel can change the position of the panel through the Arduino UNO. The second script connects PC to the second microprocessor board, repeatedly getting through the serial interface the values of the measured parameters: voltage, current strength, temperature and humidity. The next step is to send a generated POST request with the parameter values to the specified web address.

The data receiving is designed using a developed API which is implemented in the PHP server language and allows you to perform the following operations:

- getting the last values of each parameter;
- obtaining arrays of values of each parameter for graphs drawing;
- getting the current position of the panel specified by the user;
- obtaining free time for sessions to work with the laboratory stand (in order to prevent the simultaneous control of the laboratory stand by two users);
- sending parameter values;
- setting up the current position of the panel;

- booking of the session time for the laboratory stand control;
- authorization in the system;
- logout of the system.

Each transaction is implemented in a separate file, which is executed using POST/GET requests. In addition, to monitor the server status and receive a response about the operation success, each file generates a JSON response in a regulated format that contains information about the status of the request execution, the description of the error, and the service data to transmit.

The database for maintaining the progress and results of experiments with laboratory stand is implemented using MySQL and contains the following tables showing the information about:

- parameters - the values of the parameters and the time when they were received;
- position - the values of the vertical and horizontal angles of the solar panel positioning and the time it was set;
- sensor - data about the sensors which are used for measurements and models of those sensors;
- sessions - data about user sessions with a laboratory stand;
- tokens - unique identifiers given to the user for a the session time and are provided as one of the parameters for the user's requests;
- users - login credentials for users authorization.

The Web interface for monitoring parameter values and control of the position of the solar panel is implemented with the HTML markup language and JavaScript programming language using the Bootstrap, jQuery technologies and Plotly library, in particular, to display graphs. Usage of these technologies makes the web interface cross-platform and adaptive to the screen of any device.

Fig. 3 shows the view of the monitoring page that was developed.

Thus, there was developed the computer system which allows to control and monitor the laboratory stand prototype for operation research of solar panels. It makes possible to remotely perform laboratory work by students of full-time and distance forms of learning. Developed hardware and software are included as the lab work for “Telemetry and data transfer basics” subject.

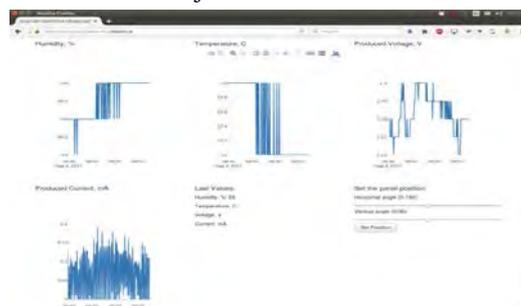


Figure 3 – Web interface for monitoring and control of solar panel positioning

1. Slabinoha M.O. Software for the microcontroller and computer interaction as a part of laboratory stand for the operation research of solar panels / M. Slabinoha, N. Klochko,

Y. Kuchirka // Information Processing systems. – 2017. – № 4(150). – P. 155-157.

УДК 769.02

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЗАДАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОРГАНИЗМА

Усольцев А.В.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова  
Ижевск, Российская Федерация

Более тридцати лет в медицинской практике для обеспечивается роста тренированности спортсмена, профилактика переутомления, перенапряжения, травм и заболеваний применяются низкоэнергетические лазерные терапевтические аппараты [1, 2]. Терапевтическая эффективность лазерного излучения чрезвычайно эффективна. «Лазерное излучение обеспечивает беспрецедентный обезболивающий эффект при острых и хронических заболеваниях, а также способствует скорейшему восстановлению после травм во время напряженного сезона», – говорит Крис Кингсли – главный тренер по физподготовке «Лос-Анджелес Кингс», обладателя Кубка Стенли-2012.

Продолжительность периодов наибольшей спортивной активности спортсмена и спада спортивной работоспособности, в общем случае, имеют случайный характер, графически это можно представить следующим образом, рисунок 1, где  $t$  – текущее время,  $t_0$  – время начала наблюдений, или время окончания предыдущего наблюдения,  $T_n$  – время наблюдения,  $t_1^b$  – время до появления первого спада спортивной активности (случайная величина),  $t_1^c$  – время применения низкоэнергетического лазерного излучения для восстановления и повышения спортивной работоспособности (случайная величина), аналогично для второго и третьего случая,  $t_1^m$  – время до начала проведения первого соревнования за время наблюдения (обычно детерминированная величина),  $t_1^i$  – время проведения первого соревнования за время наблюдения (обычно постоянная величина).

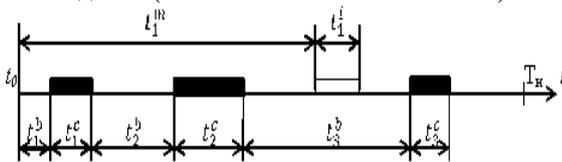


Рисунок 1 – Временные характеристики

При лазерной терапии многими авторами отмечаются десенсибилизирующий, гипохолестеринемический эффекты, повышение активности общих и местных факторов иммунной защиты. В зависимости от длины волны лазерного облучения появляются бактерицидный или бактериостатический эффекты.

Основой механизма взаимодействия низкоэнергетического лазерного излучения с биообъектом являются фотофизические и фотохимические реакции, связанные с резонансным поглощением тканями света и нарушением слабых межмолекулярных связей, а также восприятие и перенос эффекта лазерного облучения жидкими средами организма.

Даже при назначении минимальных доз лазерного воздействия, на практике, во время лечения часто наблюдается обострение болезни: чаще усиление болевого синдрома, иногда появление головокружения, головной боли, психологического дискомфорта. В медицинской литературе различают первичное обострение, возникающее при первых сеансах лазеротерапии, и вторичное — возникающее после 3-6 сеанса лазерного воздействия. Механизм первичного обострения не раскрыт. Вторичное обострение возникает из-за истощения антиоксидантной защиты больного при передозировке лазерного излучения.

Обращает на себя внимание широкая вариабельность исходных параметров. При неизменной дозе можно большой мощностью воздействовать за короткий промежуток времени и, наоборот, длительное время облучать малой мощностью. Исходя из возможности аппаратуры, остроты заболевания, состояния пациента, данных литературы, собственного опыта и т. д. принимается решение в пользу конкретных характеристик пространственно-временных параметров воздействия.

При расчете дозы необходимо учитывать, что приблизительно 50% энергии отразится от поверхности кожи. Коэффициент отражения кожей электромагнитных волн оптического диапазона достигает 43-55% и зависит от различных причин: охлаждение участка воздействия снижает значение коэффициента отражения на 10-15%; у женщин он на 5-7% выше, чем у мужчин; у лиц старше 60 лет ниже, чем у молодых; увеличение угла падения луча ведет к возрастанию коэффициента отражения во много раз. Существенное влияние на коэффициент отражения оказывает цвет кожных покровов: чем темнее кожа, тем этот параметр ниже. Так, для пигментированных участков он меньше на 6-8%. При внутрисполостной и контактно-зеркальной методиках практически вся подводимая мощность поглощается в объеме ткани в зоне воздействия.

Различна глубина проникновения лазерного излучения, которая зависит как от длины волны падающего света, так и от индивидуального состава биоткани. Экспериментальными исследованиями установлено, что проникающая способность излучения от ультрафиолетового до оранжевого диапазона постепенно увеличивается от 20 мкм до 2,5 мм с резким увеличением глубины проникновения в красном диапазоне (до 20–30 мм), с пиком проникающей способности в ближнем инфракрасном диапазоне, при длине волны 0,95 мкм – до 50 мм) и резким снижением до долей миллиметра далее. Максимум пропускания кожей электромагнитного излучения находится в диапазоне длин волн от 0,8 до 1,2 мкм.

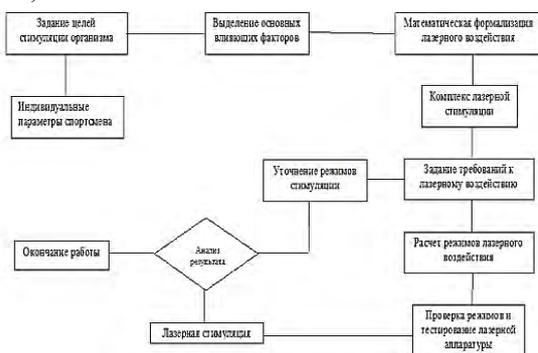


Рисунок 2 – Алгоритм работы комплекса

Разработана обобщенная вероятностная математическая модель получения заданных параметров стимуляции организма при лазерной обработке. Модель организована иерархически и содержит несколько уровней пространственной, временной организации, специализированных, соответствующих конкретному спортсмену, или универсальных, охватывающие все возможные случаи практической реализации. Если модель функционирует правильно, то чем выше уровень, тем более надежная информация в нем накапливается. В модели постоянно будет происходить фоновый процесс, отвечающий за согласование разных уровней представления информации.

На основании разработанной модели с учетом ранее приведенных исходных данных сформированы требования к индивидуальным режимам лазерного воздействия, выделены информативные

параметры, заданы начальные условия, диапазоны изменения рабочих характеристик, определен алгоритм работы, разработан алгоритм работы комплекса, рисунок 1.

Процесс обслуживания состоит из опроса спортсмена о средней продолжительности времени до появления спадов спортивной активности, средней продолжительности времени восстановления и повышения спортивной работоспособности. По полученным данным рассчитывается среднее суммарное время применения низкоэнергетического лазерного излучения для восстановления и повышения спортивной работоспособности. Исходя из технических характеристик лазерной аппаратуры, состояния спортсмена, данных методической литературы, собственного опыта врача-консультанта, конкретных характеристик пространственно-временных параметров комплекс лазерной стимуляции выполняет воздействие лазерного излучения. Не исключено коррекция параметров применения низкоэнергетического лазерного излучения после консультаций со сторонними специалистами по данному направлению.

В результате проделанной работы разработана методика задания вероятностно-временных характеристик комплекса лазерной стимуляции организма, обеспечивающая планомерный рост спортивных результатов спортсмена на протяжении всей спортивной карьеры с достижением пика спортивной формы в строго установленные сроки, за счет разработки и применения четких, объективных, универсальных индивидуальных рекомендаций по моментам применения, времени воздействия и параметрам низкоэнергетического лазерного излучения.

1. Усольцев А.В. Система контроля усталости спортсмена в процессе тренировки / Новые направления развития приборостроения: материалы 9-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2016 года Минск, Республика Беларусь). – Минск: Бел. Нац. Техн. ун-т, 2016.- С. 158.
2. Усольцев А.В. Разработка аппаратно-программного комплекса повышения спортивной работоспособности / Приборостроение - 2016 : материалы 9-й Международной научно-технической конференции, 23-25 ноября 2016 года, Минск, Республика Беларусь / редкол. Гусев О. К. [и др.]. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 141-143.

УДК615.831.7

## ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Терещенко Н. Ф., Швыдкий В. В.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

В современном медицинском приборостроении достаточно большую нишу занимают приборы и аппараты, действие которых основано на

использовании лазерного излучения, в частности аппараты для лазерной терапии. Применение лазерной терапии, отдельно или в комбинации с

другими методами физиотерапии дает результаты сопоставимые с эффективными результатами медикаментозного лечения, а иногда даже лучше него.

Однако все показатели терапевтического действия лазерного облучения организма, органов и тканей недостаточно глубоко изучены и не всегда могут быть учтены из реакций на уровне клеток и биологических жидкостей. Хотя и уделяется немало внимания исследованию физических процессов лазерной терапии и их параметров, все еще довольно часто встречаются случаи побочных реакций, недостаточного воздействия и передозировки излучением при тех же параметрах лазерной терапии, которые предоставляли исключительно положительный эффект для большинства пациентов с аналогичным заболеванием [1].

В связи с индивидуальным характером чувствительности к физиотерапевтическому воздействию, для того чтобы гарантировать положительный лечебный эффект необходимо контролировать мощность лазерного излучения (ЛИ) непосредственно на поверхности воздействия. Такой способ получения информации упростит программное обеспечение приборов за счет отсутствия необходимости высчитывать значения мощности из других параметров, также повысит эффективность работы обратной связи [2, 3].

Использование систем компьютерного обеспечения с системой обратной связи для автоматической индивидуальной оптимизации режима лазерной терапии позволило бы гарантировать и предусмотреть лечебный эффект. Предотвращение отрицательных реакций передозировки при лазерной и других видах физиотерапии существенно увеличит их преимущество по сравнению с медикаментозной терапией [4].

Важным параметром при проведении воздействия ЛИ является мощность и интенсивность излучения, так как они связаны с глубиной проникновения ЛИ и изменением температуры на участке воздействия [4, 5].

Полученная в работе [4], зависимость температуры кожи  $T$  от длительности экспозиции  $t$  и мощности дозы облучения  $E$ :

$$T = \frac{\varepsilon \cdot E \cdot S}{t \cdot \alpha}, \quad (1)$$

где  $E$  – доза облучения,  $S$  – площадь облучения,  $t$  – экспозиция (время воздействия),  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения нагрузки,  $\alpha$  – коэффициент теплообмена с внешней средой.

Выполнив расчеты по зависимости (1) от значения характеристик ЛИ с параметрами биологической ткани и сравнив с полученными фактическими значениями, мы можем прогнозировать эффективность лазерной терапии для различных биологических тканей.

Так ослабление лазерного луча в биологической ткани проходит по

экспоненциальному закону. Интенсивность коллимированного излучения оценивается по закону Бугера-Бера, который будет использоваться в качестве математической модели для проведения расчета

$$I(z) = (1 - R)I_0 \exp(-\mu_t z), \quad (2)$$

где  $R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$  – коэффициент отражения при нормальном падении пучка,  $n$  – показатель преломления биологической ткани,  $I_0$  – интенсивность падающего света,  $\mu_t = \mu_a + \mu_s$  – полный коэффициент затухания,  $\mu_a$  – коэффициент поглощения,  $\mu_s$  – коэффициент рассеяния,  $z$  – толщина образца. Сравним формулы (1) и (2), учитывая, что  $I = P/S$ , где  $P$  – мощность излучения, а  $S$  – площадь участка на которую падает луч и связав их с толщиной биологической ткани получаем следующую формулу:

$$P(z) = (1 - R) \frac{T \cdot \alpha}{\varepsilon} \cdot \exp(-\mu_t z). \quad (3)$$

Также стоит учесть, что закон Бугера-Бера не выполняется при толщине образца превышающей среднюю длину пробега однократно рассеянного фотона. Для образцов с большей толщиной необходимо вводить корректирующую составляющую, таким образом формула (3) приобретает следующий вид:

$$P(z) = (1 - R) \frac{T \cdot \alpha}{\varepsilon} \exp(-\mu_t z) \exp(ae^{b \cdot z}), \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – корректирующие коэффициенты, значение которых зависит от материала образца биологической среды.

Из полученных значений результатов исследования изменения мощности ЛИ в процессе воздействия на сало свиное модулированным и не модулированным ЛИ с переменной мощностью последнего можно сделать вывод, что изменение режима генерации ЛИ практически не изменила характера зависимости.

На рис. 1 представлены графики зависимости мощности излучения (мкВт), которая проходит через биологический объект от мощности лазера на выходе световода для сала свиного во время воздействия немодулированным излучением. Сравним полученные значения с расчетными на рис. 2.

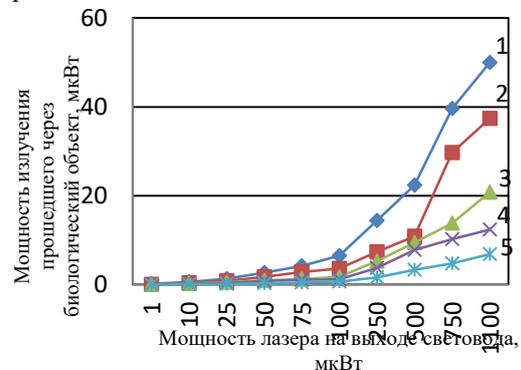


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость мощности излучения (в мкВт), которая проходит через биологический объект от интенсивности лазера на выходе световода для сала свиного толщиной: 1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм; 4 – 4 мм; 5 – 5 мм

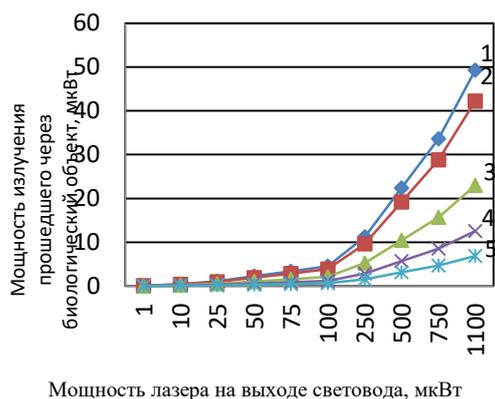


Рисунок 2 – Рассчитана зависимость мощности излучения (в мкВт), которая проходит через биологический объект от интенсивности лазера на выходе световода для сала свиного толщиной: 1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм; 4 – 4 мм; 5 – 5 мм

Анализ полученных зависимостей и проведенных исследований показывают, что увеличение мощности лазерного излучения, проходящего сквозь биологический объект, при увеличении мощности падающего излучения носит ярко выраженный экспоненциальный характер.

Предложенная математическая модель позволяет с достаточной точностью определить мощность излучения, прошедшего сквозь биологический объект, отклонение рассчитанных значений от экспериментальных составляет  $\pm 5$  мкВт.

УДК: 621.373:535

## КОНКУРЕНЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ АНИЗОТРОПИИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ И АНИЗОТРОПИИ РЕЗОНАТОРА В ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Свирина Л.П.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Поляризация генерируемого излучения в лазере определяется совокупным влиянием анизотропии активной среды и анизотропии резонатора. Анизотропия среды определяется квантовомеханическими свойствами атомов и молекул активного вещества и носит нелинейный характер. Она возникает в результате взаимодействия генерируемого излучения со средой и зависит от интенсивности и поляризационных характеристик излучения. Например, для гелий-неоновых лазеров анизотропия среды обладает линейным и круговым дихроизмом и двулучепреломлением. В такой среде без изменения состояния поляризации могут распространяться ортогональные линейно (или циркулярно) поляризованные волны. Анизотропия резонатора создается помещением внутрь него анизотропных элементов (поляризаторов, четвертьволновых пластинок, и др.). Внешние поля, например, продольное магнитное поле, могут

Исследован характер изменения мощности ЛИ в зависимости от толщины при прохождении через сало свиное, и переменных мощностях излучения. Полученные данные будут использованы для создания физиотерапевтического аппарата с системой обратной связи, которая позволит в реальном времени автоматически вносить изменения в параметры проведения физиотерапевтической процедуры и улучшить лечебный эффект.

1. Терещенко М. Ф. Оцінка та контроль ефективності впливу на біологічний об'єкт лазерним випромінюванням / М. Ф. Терещенко, С. П. Якубовський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. 2012. Вип. 44. С. 141 – 148.
2. Терещенко М. Ф. Контроль дози лазерного опромінення біологічних тканин температурним методом / М. Ф. Терещенко, І. В. Максимчук, Л. А. Мамедова, С. П. Якубовський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 175–180.
3. Тимчик Г. С. Моніторинг зміни температур при лазерній терапії / Тимчик Г. С., М. Ф. Терещенко, Печена М. Р. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2014. – Вип. 47. – С. 156–162.
4. Терещенко М. Ф. Дослідження впливу лазерного випромінювання на температурні процеси в біологічних тканинах / М. Ф. Терещенко, Тимчик Г. С., Ляшенко О. Г., Гнатейко О. С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. 2015. – Вип. 49(1). – С. 153–158.
5. Терещенко Н. Ф. Использование программно-аппаратного комплекса CARDIOMOOD в оценке действия лазерного излучения на состояние вегетативной нервной системы человека / Н. Ф. Терещенко, Апыхтин К. А., Прендиок О. С., Махия Н. В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2015. – Вип. 50(2). – С. 160–169

налагаться как на активную среду, так и на элементы резонатора.

Если анизотропия среды и резонатора одинаковая, например, круговая (линейная), то поляризация генерируемого излучения будет круговой (линейной). Если же анизотропия среды круговая, а резонатора линейная, то поляризация генерируемого излучения будет зависеть от соотношения величины анизотропии среды и резонатора. Если анизотропия среды намного больше анизотропии резонатора, то поляризация генерируемого поля будет определяться средой. Если анизотропия резонатора намного больше анизотропии среды, что наиболее часто реализуется в лазерных приборах, то поляризация генерируемого поля будет определяться резонатором. Например, линейная поляризация излучения промышленного гелий-неонового лазера достигается за счет расположения окон газоразрядной трубки под углом Брюстера.

При сопоставимых по величине анизотропии среды и резонатора и сильно различающихся типах анизотропии (у среды – круговая, у резонатора – линейная) возможно нестационарное поведение поляризации, которое возникает в результате потери устойчивости стационарного режима генерации и возникновения устойчивых автоколебаний. Данное явление получило название конкуренции анизотропии среды и анизотропии резонатора, или поляризационной неустойчивости.

Целью настоящей работы является описание автоколебательных режимов генерации для различных типов анизотропии среды и анизотропии резонатора.

Теоретическое исследование проведено на основе разработанной и экспериментально апробированной модели одномодового двухчастотного газового лазера с произвольной величиной и типом анизотропии резонатора [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{d\tau} + 2iI_1 \frac{d\Psi_1}{d\tau} - 2I_1 i(\omega_1 - \omega_{1c}) \frac{Lc}{\tau_0} = \\ = -2I_1(i \operatorname{th} 2\beta_1 \frac{d\gamma_1}{d\tau} + i \frac{\bar{V}_1}{P} + \frac{P_1}{P} + \\ + \frac{\Delta W_1}{P} \operatorname{th} 2\beta_1 - m_1 - I_1 \varrho_{11} - I_2 \varrho_{12}), \\ \frac{dI_2}{d\tau} + 2iI_2 \frac{d\Psi_2}{d\tau} - 2I_2 i(\omega_2 - \omega_{2c}) \frac{Lc}{\tau_0} = \\ = -2I_2(i \operatorname{th} 2\beta_2 \frac{d\gamma_2}{d\tau} + i \frac{\bar{V}_2}{P} + \frac{P_2}{P} + \\ + \frac{\Delta W_2}{P} \operatorname{th} 2\beta_2 - m_2 - I_2 \varrho_{22} - I_1 \varrho_{21}), \\ \frac{dz_1}{d\tau} = n_1 + i \frac{\Delta W_1}{P} + I_1 \rho_{11} + I_2 \rho_{12}, \\ \frac{dz_2}{d\tau} = n_2 + i \frac{\Delta W_2}{P} + I_2 \rho_{22} + I_1 \rho_{21}. \end{aligned}$$

Здесь  $I_{1,2}$  – безразмерные интенсивности,  $\Psi_{1,2}$  – фазы волн генерируемых волн 1, 2,  $z_{1,2} = \gamma_{1,2} + i\beta_{1,2}$  – комплексные параметры поляризации,  $\gamma_{1,2}$  – азимуты,  $\xi_{1,2} = \operatorname{th} \beta_{1,2}$  – эллиптичности. Остальные обозначения аналогичны принятым в [1].

Численное интегрирование уравнений генерации проведено для параметров He Ne ( $\lambda = 0.63$  мкм) лазера для различных переходов между рабочими уровнями среды и различных типов анизотропии резонатора, которая изменяется от линейной до циркулярной.

Тип перехода между рабочими уровнями активной среды определяет анизотропию и собственные состояния поляризации среды. При этом, как показано в [2], собственными состояниями поляризации активной среды двухчастотного лазера для  $j \leftrightarrow j$  переходов ( $j$  – главное квантовое число) являются ортогональные линейно поляризованные волны, а для переходов  $j \leftrightarrow j+1$  – ортогональные циркулярно

поляризованные волны, возникающие вследствие снятия вырождения лазерной моды при переходе от одночастотного режима, характерного для лазера с изотропным резонатором, к двухчастотному режиму, обусловленному появлением фазовой анизотропии.

Собственные состояния поляризации резонатора и тип перехода в среде показаны наверху каждой колонки.

Рисунок 1 иллюстрирует автоколебательные режимы генерации для перехода  $j \leftrightarrow j+1$  в среде в случае линейных (слева) и эллиптических (справа) собственных векторов матрицы резонатора с малой эллиптичностью. Эллиптические состояния поляризации создаются при помещении в резонатор линейной и циркулярной фазовых пластинок;  $\psi$  и  $\phi$  – величины линейной и циркулярной фазовой анизотропии резонатора, соответственно. Как видно из рисунка, в случае линейной фазовой анизотропии резонатора, ( $\psi \neq 0$ ,  $\phi = 0$ ) имеют место периодические изменения во времени всех характеристик лазерного излучения: интенсивностей  $I_{1,2}$  (а), азимутов  $\gamma_{1,2}$  (б) и эллиптичностей  $\xi_{1,2}$  (в). При этом состояние поляризации излучения периодически изменяется от линейного к круговому и обратно.

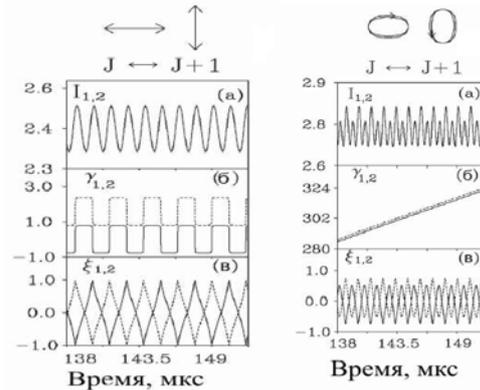


Рисунок 1 – Автоколебания для  $j \leftrightarrow j+1$  переходов между рабочими уровнями среды

На рисунке 2 показаны автоколебательные режимы генерации для перехода  $j \leftrightarrow j$  в среде в случае эллиптических ( $\psi \neq 0$ ,  $\phi \neq 0$ ) с большими значениями эллиптичности (слева) и циркулярных (справа,  $\psi = 0$ ,  $\phi \neq 0$ ) собственных векторов матрицы резонатора. Как видно из рисунка, в первом случае наблюдаются автоколебания второго рода с колебаниями интенсивностей и эллиптичностей волн генерации и вращающимися азимутами, а во втором случае интенсивности и эллиптичности постоянны при вращающихся азимутах.

Автоколебания, показанные на рисунке 1 (слева и справа) обнаружены и изучены экспериментально в [2–4], режим генерации, приведенный на рисунке 2 (справа) обнаружен в [5], количественное сопоставление теории с экспериментом проведено в [4].

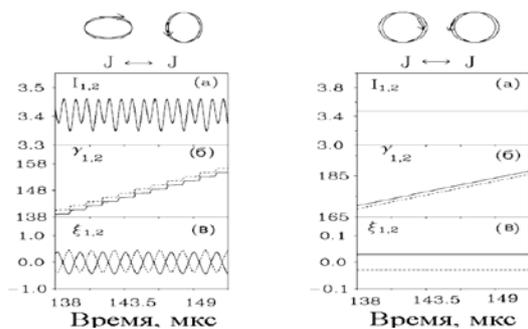


Рисунок 2 – автоколебания для  $j \leftrightarrow j$  переходов между рабочими уровнями среды

1. Svirina, L.P. A two-frequency gas laser with weakly anisotropic cavity / L.P. Svirina // Opt. Commun. – 1994. – Vol. 111, № 2. – P. 380–390.
2. Le Floch, A. Dynamics of laser eigenstates / A. Le Floch, G. Ropars, J.M. Lenormand, and R. Le Naour // Phys. Rev. Lett. – 1984. – Vol. 52, № 1. – P. 918–921.
3. Puccioni, J.P. Differences in polarization dynamics of the electromagnetic field in xenon and neon lasers / J.P. Puccioni, J.L. Lippi, N.B. Abraham, and F.T. Arecchi // Opt. Commun. – 1989. – Vol. 72. – P. 361–366.
4. Svirina, L.P. Spontaneous pulsations in gas class-A lasers with weakly anisotropic cavities / L.P. Svirina, V.G. Gudelev, and Yu. P. Zhurik // Phys. Rev. A – 1997. – Vol. 56, № 6. – P. 5053–5065.
5. Cotteverte, J.C. Dynamics of circularly polarized eigenstates in lasers with nonweak atomic coupling / J.C. Cotteverte, F. Bretenaker, and Le Floch A. // Opt. Lett. – 1991. – Vol. 16, № 8. – P. 572–574.

УДК 621.373.826

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ОБУГЛИВАНИЕМ

Усольцева А.В.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова  
Ижевск, Российская Федерация*

Любая отрасль мировой экономики зависит от материалов и техники, используемых в процессе производства. В производстве используются различные материалы, одними из наиболее распространенных, используемых во многих сферах, с учетом функциональной, эстетической и экологической точек зрения, в первую очередь, выделяются натуральные материалы, термическое воздействие на которые сопровождается их почернением, уменьшением содержания водорода, кислорода и увеличением углерода (древесина, пластик, натуральная и искусственная кожа, кость и т.д.). Создание уникальной продукции высокого уровня напрямую связано с постоянным развитием и усложнением методов, используемых для разработки, а также с применением прогрессивных инновационных технологий производства. В таком случае результат работы будет определяться гармоничным развитием технических решений, использованных при разработке новой продукции. Довольно часто не удается реализовать потенциальные возможности с качеством продукции, предусмотренным проектом, в связи с недостаточной изученностью технологических возможностей инновационных наукоемких технологий и отсутствием технологических рекомендаций для их применения. Качество продукции обеспечивается выполнением соответствующих требований к качеству составляющих, точности выполнения технических условий, технологических режимов, размеров, отклонений от формы, взаимного расположения, состояния обработанных поверхностей.

Повышение качества поверхностного слоя является актуальной проблемой технологии, решение которой требует опережающего подхода

в условиях быстрого технического развития и рыночной экономики, породившей острую конкуренцию среди производителей. Большинство процессов поверхностной обработки материалов имеют термическую природу, любая структура, любое состояние материала определяется четырьмя основными характеристиками теплового состояния: температура нагрева, скорость нагрева, время нагрева, скорость охлаждения.

Широкое распространение в промышленности получают лазерные технологии. Эффективность лазерных технологий обусловлена высокой плотностью потока энергии лазерного излучения в зоне обработки, возможностью фокусировки излучения с помощью оптических систем в световой луч диаметром в сотые доли миллиметра, возможностью ведения технологических процессов в любой прозрачной среде, малой зоной прогрева, обеспечиваемой кратковременным воздействием излучения, а также возможностью бесконтактной подачи энергии к зоне обработки в замкнутом объеме. Посредством лазерного излучения осуществляют резку, сверление отверстий, термическую обработку, гравирование, маркирование и многие другие технологические операции. Лазерное излучение существенно превосходит другие источники энергии, что позволяет не только значительно увеличить производительность обработки, но и получать качественно новые результаты по свойствам поверхности обрабатываемых материалов. В этой связи лазерный луч как источник нагрева имеет как общие особенности, свойственные всем другим высококонцентрированным источникам, так и свои специфические преимущества. Тем не менее для поверхностной обработки материалов с обугливанием лазерное излучение применяется

недостаточно широко из-за отсутствия апробированных методик, наличия дополнительных требований по эстетическим свойствам, таким, как форма, рисунок, фактура и цвет. Ряд теоретических и практических вопросов остаются недостаточно изученными. В частности, не изучена взаимосвязь между технологическими режимами работы лазерного оборудования и характеристиками поверхности промышленных изделий, не исследована степень влияния отдельных эстетических показателей на интегральную оценку потребительских свойств промышленных изделий. Действующие нормативные документы опускают процедурные вопросы, связанные с организацией и проведением объективной оценки качества поверхности при обработке. Различное толкование терминов вносит дополнительную путаницу и имеет весьма серьезные последствия, сдерживающие широкое применение лазерных технологий для обработки органических материалов. Использование нормативных документов из смежных областей промышленности, в частности, полутонового клина, предназначенного для испытания факсимильной аппаратуры типа 2, подгруппы 1 по ГОСТ 12922-77, хотя она и совместима программно и аппаратно с лазерными установками, не всегда обосновано из-за возникновения дополнительных трудностей в реализации. Формирование критериев оценки с учетом физико-химических процессов, сопровождающих воздействие лазерного излучения на материал, дает не плохие результаты, позволяет повысить предсказуемость полученных результатов. Качество обработанной поверхности определяется отклонением физических и механических свойств верхнего слоя материала. Геометрическое качество поверхности при наличии на ней выступов, впадин, штрихов и других неровностей на малых участках определяет микрогеометрию поверхности. Процессы лазерной поверхностной обработки являются многофакторными и многокритериальными. Управлять процессом, меняя все факторы невозможно. Поэтому из всех названных факторов выделены основные, которые называются управляющими. На микрогеометрию поверхности при лазерном гравировании, в основном, влияют следующие факторы: технологические режимы (мощность лазерного излучения, скорость гравирования, разрешающая способность, частота импульсов, диаметр сфокусированного лазерного луча на материале), динамические характеристики устройства перемещения лазерного луча, механические свойства обрабатываемого материала.

Для расширения областей применения лазерного излучения для обработки промышленных изделий из материалов с обугливанием проведено исследование микронеровностей поверхности при лазерном

гравировании. Для этого использовалось воспроизведение полутонового клина по ГОСТ 24930-81, имеющего 15 ступеней оптической плотности на тангенциальном, радиальном и поперечном разрезах древесины хвойных и лиственных пород, натуральной и искусственной коже, кости, органическом стекле.

Учитывая микроструктуру, химический состав и физико-механические характеристики используемых материалов для проведения исследований выбрана лазерная установка на углекислом газе  $\text{CO}_2$ . Анализ изменений состояния поверхности проводился при изменении мощности лазерного излучения от 2 до 12 Вт, скорости движения лазерного луча от 10 до 180 см/с, разрешающей способности, количества линий на дюйм, от 100 до 1000 dpi., частоты импульсов излучения от 500 до 1000 Гц, диаметра сфокусированного лазерного луча на материале от 0,05 до 1,0 мм, угла падения лазерного луча от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , и комбинации этих режимов.

Для оперативного управления технологическим процессом, получения точных исходных данных, разработана система управления лазерным технологическим процессом обработки материалов в реальном масштабе времени. Функциональная схема системы представлена на рисунке 1.

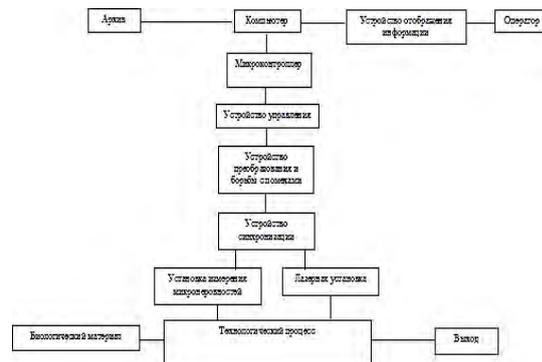


Рисунок 1 – Функциональная схема системы

Функционирование системы управления лазерным технологическим процессом осуществляется следующим образом. На начальном этапе формируется архив на основании базы данных изменения состояние поверхности материалов при лазерной обработке, функционально-корреляционных связей между характеристиками поверхности материала и параметрами лазерного излучения. Далее, на основании полученных статистических результатов, задаются режимы лазерной обработки, контролируются характеристики поверхности, при отклонении результатов от заданных производится коррекция.

Проведенные исследования показали, что, для достижения заданных параметров поверхности материалов с обугливанием при лазерной обработке

перспективно использование комплексного подхода, учитывающего существование функционально-корреляционных связей между параметрами, характеризующими технологию лазерной обработки и состояние поверхности материала. Проведенные исследования позволяют повысить эффективность применения лазерной техники при создании новых

технологий поверхностной обработки. Предлагаемый способ позволяет максимально сохранить уникальные индивидуальные свойства материала, успешно компенсировать имеющиеся естественные неоднородности материала и обеспечить стабильно высокие результаты при масштабном применении лазерных технологий.

УДК 535.37

### СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ФТОР-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЭРБИЯ И ИТТЕРБИЯ

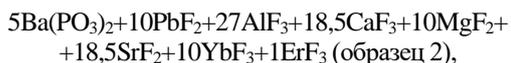
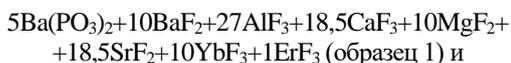
Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Дернович О. П.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Колобкова Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) Санкт-Петербург, Российская Федерация

Генерация излучения в области спектра 1,5 мкм представляет значительный интерес для применений в системах оптоволоконной связи, для дальнометрии, так как излучение в этой области спектра является условно безопасным для зрения. Особый интерес здесь представляют стекла, активированные ионами эрбия, как активные среды для создания волоконных лазеров и усилителей. Состав стекляннной матрицы во многом определяет спектроскопические и физические свойства активной среды в целом.

В данной работе изучались спектроскопические характеристики эрбий-иттербиевых фторфосфатных стекол вида, которые отличаются наличием групп ВаF<sub>2</sub> и PbF<sub>2</sub>



с целью установить влияние состава стекляннной матрицы на спектроскопические характеристики ионов эрбия.

Синтез стекол осуществлялся при температуре 1050 С° в стеклоуглеродном тигле. Плотность образца 1 – 3,1 г/см<sup>3</sup>, образца 2 – 3,38 г/см<sup>3</sup>. Концентрации ионов Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> в образце 1 – 1,5 · 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup> и 1,5 · 10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>, соответственно. Для образца 2 аналогичные величины составляли – 1,55 · 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup> и 1,55 · 10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>, соответственно.

Регистрация спектров поглощения производилась на спектрофотометре Cary 5000, а спектров люминесценции на экспериментальной установке, в состав которой входят набор фотоприемников на инфракрасную и видимую области спектра, монохроматор МДР 23, работающий под управлением компьютера, синхронный усилитель SR830.

На рис. 1 и 2 представлены спектры сечений поглощения образцов 1 и 2, обусловленные переходами с основного уровня <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> на более

высоколежащие для ионов эрбия и для перехода <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> иона иттербия. Как видно из этих рисунков, никаких существенных различий в спектрах для обоих образцов не наблюдается. Так же не наблюдается существенных различий для спектральных линий люминесценции в ИК (рис. 3) и видимой областях спектра (рис. 4).

Из этого можно сделать вывод, что ионы Ва и Pb не входят в ближайшее окружение ионов эрбия и иттербия и не влияют на их поглощательные и люминесцентные свойства.

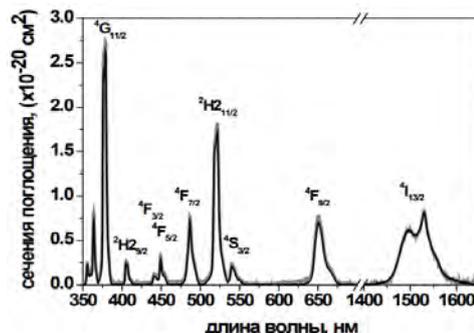


Рисунок 1 – Спектры сечений поглощения ионов Er<sup>3+</sup> в образцах 1 (серый цвет) и 2 (черный цвет). Основной уровень <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>

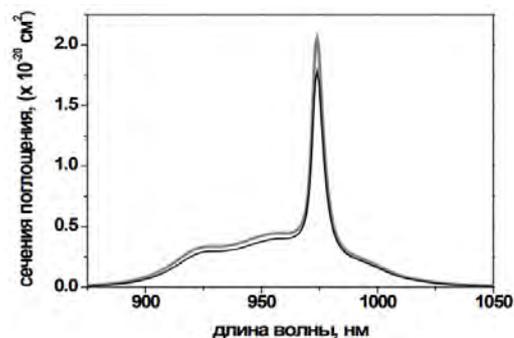


Рисунок 2 – Спектры сечений поглощения Yb<sup>3+</sup> в образцах 1 (серый цвет) и 2 (черный цвет) на переходе <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>

На основе спектров сечений поглощения (см. рис. 1, образец 1) был проведен расчет интенсивностей линий в спектре поглощения по

методу Джадда-Офельта. Значения матричных элементов приведенного тензора U были взяты из работы [1]. Экспериментальные и расчетные значения сил осцилляторов представлены в таблице 1. В таблице 2 приведены значения омега параметров, которые получаются при подгонке расчетных электродипольных сил осцилляторов к экспериментальным.

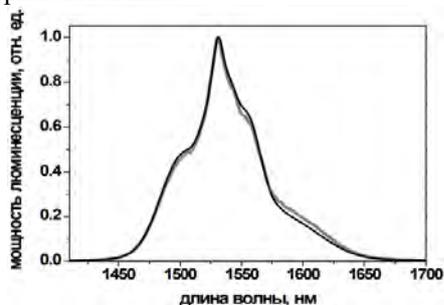


Рисунок 3 – Спектры люминесценции Er<sup>3+</sup> в образцах 1 (серый цвет) и 2 (черный цвет). Переход <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>

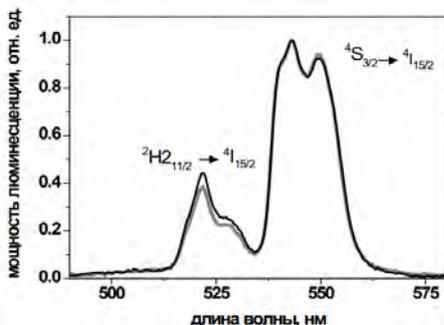


Рисунок 4 – Спектры люминесценции Er<sup>3+</sup> в образцах 1 (серый цвет) и 2 (черный цвет) в видимой области спектра

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные электродипольные силы осцилляторов.

Возбужденные состояния	$f_{exp}^{ed} \cdot 10^6$	$f_{calc}^{ed} \cdot 10^6$
<sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	2,25	2,10
<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	0,34	0,39
<sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	2,84	2,83
<sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> + <sup>2</sup> H <sub>211/2</sub>	6,66	7,06
<sup>4</sup> F <sub>7/2</sub>	2,45	3,14
<sup>4</sup> F <sub>5/2</sub> + <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	1,15	1,61
<sup>2</sup> H <sub>29/2</sub>	0,89	1,21
<sup>4</sup> G <sub>11/2</sub>	11,64	11,21
<sup>2</sup> G <sub>17/2</sub> + <sup>4</sup> G <sub>9/2</sub>	2,93	2,56
rms. dev. · 10 <sup>6</sup>	0,46	

Таблица 2. Омега параметры

$\Omega_2 \cdot 10^{20}$ , см <sup>2</sup>	$\Omega_4 \cdot 10^{20}$ , см <sup>2</sup>	$\Omega_6 \cdot 10^{20}$ , см <sup>2</sup>
3,74	1,86	2,25

Согласно расчетам по Джадду-Офельту радиационное время жизни иона эрбия на верхнем лазерном уровне (<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>) составляет 6.4 мс.

Полученное радиационное время дало возможность рассчитать спектры стимулированного испускания для ионов эрбия на лазерном переходе <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>. Расчеты проводились по двум методам: по формуле Фюхтбауэра-Ладенбурга (ФЛ) и модифицированному методу соответствия (ММС) [2]:

Результаты расчетов представлены на рис. 5.

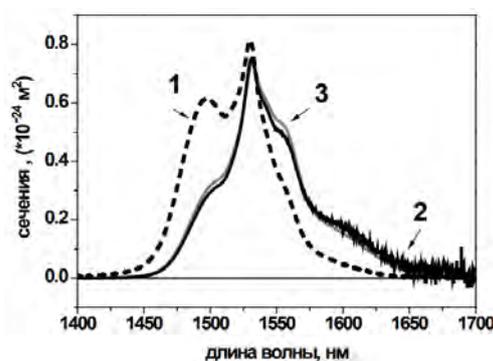


Рисунок 5 – Спектры сечений поглощения (1), стимулированного испускания 2 (ММС) и 3(ФЛ)

Как видно, результаты расчетов по двум методам находятся в прекрасном соответствии друг с другом.

Таким образом, проведен анализ влияния состава стекланной матрицы на стационарные спектры поглощения и люминесценции ионов Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> во фторфосфатных стеклах. Рассчитаны омега параметры и радиационное время жизни для ионов эрбия (<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>). Определены спектры сечений поглощения и стимулированного испускания на лазерном переходе <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>.

1. Kaminskii A.A., Mironov V.S., Kornienko A.A. [et. al] Intensity Luminescence Characteristics, Stimulated Emission, and Full Set of Squared Reduced-Matrix Elements  $\langle \alpha[SL]J || U^{(0)} | \alpha'[S'L']J \rangle$  for Er<sup>3+</sup> Ions // Phys. Stat. sol. (a), 1995, vol. 151, pp.231-255.
2. Yasyukevich A.S., Shcherbitskii V.G., AV Mandrik et al Integral Method o Reciprocity in the Spectroscopy of Laser Crystals with Impurity Centers // Journal of Applied Spectroscopy, 2004, vol. 71 (2), pp. 202-208

УДК 681.7.069.3

## СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТРИЦЫ ДЛЯ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Цедик В.А.<sup>1</sup>, Шахлевич Г.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «МНИПИ»

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Обработка видеоинформации подразделяется на три основных направления: визуализация, обработка и распознавание изображений.

Визуализация – создание изображения на основе описания (модели) некоторого объекта. Важными факторами при визуализации являются: скорость изменения кадров, насыщенность сцены объектами, качество изображения [1].

Основным структурным элементом систем визуализации изображений являются светочувствительные матрицы. Их главный классификационный признак – метод считывания заряда. По данному признаку матрицы делятся на КМОП (комплементарный металл-оксид проводник) и ПЗС (прибор с зарядовой связью).

В ПЗС-сенсоре заряды, образовавшиеся в светочувствительных элементах (пикселях), перемещаются и преобразуются в сигналы. Заряды, накопленные в пикселях под воздействием полупроводникового электрода, передаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) посредством множества операций сдвига с участием параллельных («вертикальных») и последовательных («горизонтальных») регистров сдвига (рисунок 1). Перенос зарядов обеспечивается с помощью электрических полей, которые создаются электродами в сенсорах [2].

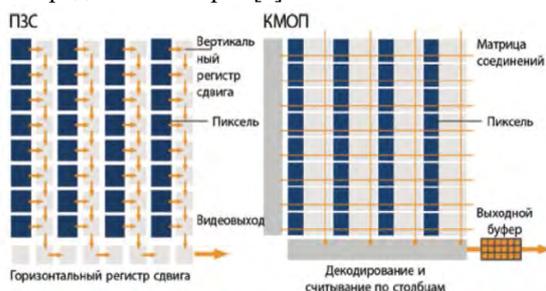


Рисунок 1 – Принцип работы ПЗС и КМОП матриц

В КМОП-сенсорах для хранения заряда параллельно каждому пикселю включен конденсатор [3]. Он заряжается от пикселя фототоком, который образуется при его экспозиции. Напряжение в конденсаторе пропорционально яркости света и продолжительности экспозиции. В отличие от ПЗС-сенсоров, электроны, захваченные конденсаторами при воздействии на сенсор света, не передаются на единый выходной усилитель, а преобразуются в измеримое напряжение непосредственно на месте с помощью электронных схем, включенных в каждый пиксель. Полученные значения напряжения затем

могут быть переданы на процессор аналоговых сигналов.

С помощью дополнительных электронных схем информация может считываться с каждого пикселя независимо, без перемещения заряда, как в ПЗС-сенсорах. Как следствие, считывание осуществляется гораздо быстрее, а искажения изображения, связанные с чрезмерной экспозицией («вуаль» и «размытие») возникают гораздо реже либо вовсе отсутствуют. Однако дополнительная площадь, необходимая для размещения электронной схемы каждого пикселя, не относится к светочувствительной области. На поверхности сенсора она, таким образом, будет меньше, чем у ПЗС-сенсора (рисунок 2). По этой причине КМОП сенсор способен аккумулировать меньшее количество фотонов для преобразования в информацию изображения.

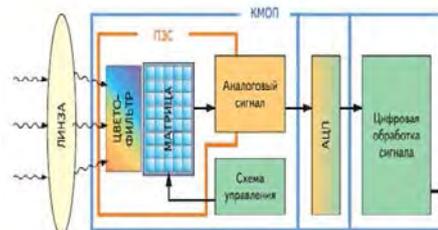


Рисунок 2 – Структурная схема ПЗС и КМОП матриц

В современных КМОП сенсорах с цифровым пикселом (Digital Pixel Sensor) (рисунок 3) в каждый пиксель интегрируется не только активный усилитель, но и АЦП, состоящий из 37 транзисторов. При этом частота преобразования АЦП становится равной кадровой частоте фотоприёмника, а полоса частот видеосигнала уменьшается до минимальных значений.



Рисунок 3 – КМОП сенсор с активным цифровым пикселом

Поскольку КМОП-технология является по сути процессорной, она подразумевает не только «захват» света, но и процесс преобразования,

обработки, очистки сигналов от собственных шумов и шумов других компонентов устройства.

При необходимости получения изображения с высоким разрешением используют ПЗС матрицы с несколькими выводами. Перенос заряда в ПЗС-сенсоре занимает много времени. Это становится ощутимым недостатком в случае сенсоров с высоким разрешением, в которых заряд передается на центральный усилитель посредством множества операций сдвига с огромным количеством пикселей. В результате накладывается ограничение на максимально возможную частоту кадров. Техническое решение в обход этой проблемы – сенсор с несколькими выводами (рисунок 4).

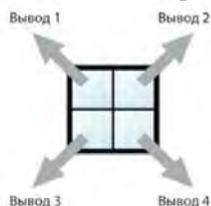


Рисунок 4 – ПЗС матрица с 4 выводами

На поверхности такого сенсора предусмотрено несколько зон вывода. Каждая такая зона оснащена собственной электронной схемой (так называемым выводом), генерирующей сигнал, который передается отдельно каждой из зон вывода. Информация изображения, получаемая в зонах вывода, переносится на более короткое расстояние, а также усиливается и считывается всеми электронными схемами вывода одновременно и, как следствие, намного быстрее. Затем из этой информации осуществляется компоновка изображения. Поскольку в процессе участвуют несколько электронных схем вывода, это обеспечивает высокое разрешение и скорость съемки, однако чрезвычайная сложность процесса представляет собой немалый недостаток. Отдельные электронные схемы вывода должны быть аккуратно установлены одна над другой. Даже малейшие отклонения приведут к видимым дефектам изображения в виде четких границ зон вывода, которые, прежде всего, будут заметны невооруженным глазом. Сенсоры с несколькими выводами, как правило, отличаются более высоким энергопотреблением, что означает усиленное

тепловыделение. Это обычно приводит к повышению уровня шума сенсора и, в частности, в определенных условиях порождает необходимость в принятии дополнительных мер по его охлаждению.

КМОП-сенсоры высокого разрешения с глобальным затвором появились совсем недавно. Большинство сенсоров ранее оснащались только технологией скользящего затвора. Многие предлагаемые сегодня КМОП-сенсоры превосходят ПЗС-сенсоры, в том числе, по качеству изображения. В настоящее время разработаны КМОП сенсоры с цифровым пикселем размером менее  $1,25 \times 1,25$  мкм, которые позволяют снимать видеоизображение с разрешением  $4096 \times 2304$  при скорости 60 кадров в минуту.

Высокое быстродействие КМОП матриц связано с тем, что в ПЗС матрицах сигнал передается последовательно от пикселя к пикселю, пока все сигналы не попадут в АЦП, а в КМОП матрицах сигналы из каждого пикселя сразу передаются в АЦП.

Важнейшим преимуществом КМОП матрицы является единство технологии с остальными, цифровыми элементами аппаратуры. Объединение на одном кристалле аналоговой, цифровой и обрабатывающей части является основой для миниатюризации видеокамер различного назначения и снижения их стоимости ввиду отказа от дополнительных процессорных микросхем, а также значительного уменьшения их энергопотребления. [4].

1. Снижко, Е.А. Компьютерная геометрия и графика: конспект лекций / Е.А. Снижко. – М.: М-во образования и науки Рос. Федерации, Балт. гос. техн. ун-т «Военмех», Ин-т систем упр. и упр. систем, Каф. информ. систем и компьютер. технологий. – Санкт-Петербург : Балт. гос. техн. ун-т, 2003. – 129с.
2. Rene von Fintel, White paper // Basler AG. – 2015. – No 5. – P. 1–3.
3. Манцветов, А.А. Телекамеры на КПОП фотоприёмниках / А.А. Манцветов, А.К. Цыцулин – М.: Техника телевидения, 2006. – 248 с.
4. Анацкий, А.А. КМОП сенсоры для систем визуализации изображений / А.А. Анацкий, В.Г. Назаренко // VII Междунар. форум информац. технологий. XXI Междунар. НТК «Информац. системы и технологии» ИСТ-2015. Н.Новгород, 17–19 апреля 2015 г.: сб. статей. – Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. – С.24–2.

УДК 535.015, 535.422

## ОПТИМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

**Звонкович А.В., Фёдорцев Р.В.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Космическая среда оказывает агрессивное воздействие на конструкции космических аппаратов и другие искусственные объекты, находящиеся на околоземной орбите. Резкие перепады высоких и низких температур (от  $+140$  °С до  $-120$  °С), вакуум,

солнечный ветер и другие виды случайных воздействий, вызывают деформации корпуса объектива для ДЗЗ, рамных конструкций телескопа и приводят к существенным проблемам по обеспечению высокой точности измерений для

оптико-электронных систем.

При рассмотрении конструкционных методов повышения точности измерений, можно выделить изготовление фермы с высокой геометрической стабильностью, конструкция которой имеет силовой корпус, состоящий из продольных, поперечных и диагональных криволинейных биметаллических пластин. Поскольку корпус состоит из множества таких пластин, обеспечивается размерная стабильность всего космического телескопа, не смотря на воздействие температур.

Усовершенствование данной конструкции возможно за счёт изменения материалов, а именно использования композитных материалов. В качестве активного слоя выступает пластина, выполненная из стеклопластика, а инертный слой представлен с меньшим коэффициентом линейного расширения из углепластика.

Надежность и статичность конструкции обеспечивается за счёт свойств выбранных материалов, а именно стеклопластика и углепластика.

Стеклопластик является композитным материалом, т.е. его изготавливают посредством соединения стекловолокна, выступающего в роли наполнителя, и полимерного связующего. Стекловолоконистый наполнитель является уплотняющим слоем, он обеспечивает прочность стеклопластика и устойчивость к механическим нагрузкам. Полимерное связующее предназначено для равномерного распределения напряжений между стеклянными волокнами, а так же их склеивания.

Стекланные волокна обладают высокой теплоустойкостью (1000 °C и выше), коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) при нагреве до 300 °C составляет  $49 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

В условиях коррозионно-активных сред с температурой выше 80°C в стеклопластике возникают значительные напряжения, за счёт разности коэффициентов линейного расширения наполнителя и связующего. В данном случае играет роль процентное соотношение материалов, так при соотношении стеклонаполнителя и смолы по массе 25:27, происходит разрушение, даже без коррозионного воздействия среды. Оптимальным по массе считается соотношение 60:40. Данное условие обеспечивает высокую физическую стойкость и прочность.

Физико-механические свойства, такие как теплоустойчивость, коэффициент линейного расширения и другие, будут зависеть прежде всего от свойств связующего. Поскольку причиной возникновения поставленной проблемы является большой перепад температур, основным требованием к связующему материалу будет являться устойчивость как к низким так и к высоким температурам плавления и возгорания. Подавляющее большинство стеклопластиковых изделий изготавливается на основе ненасыщенных полиэфирных смол. К наиболее стойким и

трудновоспламеняемым относятся смолы марок ПН-6, ПН-7 и ПН-62.

Также для получения теплоустойких деталей используют фурановые смолы, марки ФФС или лаки марок ФЛ-1, ФЛ-2, ФЛ-10, ФЛ-12 и другие.

В качестве связующего также возможно применение фенольной смолы, не уступающей по характеристикам выше описанной. Теплоустойкие фенольные стеклопластики выдерживают температуру 3870 °C в течение 45 с, 1650 °C в течение 5 мин и 316 °C неопределенно долгое время.

Таким образом, стеклопластик – материал, физические и химические свойства которого зависят от вида входящих в него компонентов, их количества и конфигурации укладки. Фактически, меняя схемы армирования (т.е. виды расположения стекловолокон) можно получать различные прочностные характеристики.

Удельный вес стеклопластика в 3,5 раза меньше, чем у стали, а вес двух равнопрочных деталей будет отличаться более чем в 2 раза, несмотря на более низкое значение предела прочности чем у стали, но в тоже время более высокое значение удельной прочности. Также стоит отметить, что одной из особенностей стеклопластиков является их диэлектрические свойства, низкая теплопроводность и хорошая коррозионная стойкость.

Вторым материалом, обеспечивающим размерную стабильность корпуса является углепластик – композиционный многослойный материал, образованный покрытием нескольких слоев полотна из углеродистых волокон оболочкой из термореактивных полимерных смол. Так же данный материал имеет название карбон (в настоящее время к карбонам относят все композитные материалы, в которых несущая конструкция выполнена из углеродного волокна).

Углеродное волокно представляет собой совокупность тонких нитей ( $\varnothing \sim 0,005\text{--}0,01 \text{ мм}$ ), которые не достаточно прочны при воздействии внешних нагрузок, однако имеющие высокую прочность при растяжении. Поэтому наиболее оправдано использование данного материала в качестве полотна.

Карбоновое волокно представляет собой композит, состоящий из нитей углеводорода, переплетенных с нитями резины или кевлора. Данное волокно является армирующим элементом. К тому же нити переплетают под различными углами в каждом новом слое, что обеспечивает равнопрочностные характеристики по всех направлениях. В листе карбона на 1 мм приходится 3–4 таких слоя. Затем производится пропитка эпоксидными смолами, которые окончательно скрепляет конструкцию.

Одной из важнейших характеристик конструкционных материалов является размерная стабильность детали, изготовленной из данного материала, при воздействии температур.

Для различных углепластиков теплофизические

показатели находится в следующих диапазонах:

- для коэффициентов теплопроводности 0,5...1,0 Вт/м·С;
- для коэффициентов термического расширения  $(-1,5...0,5) \cdot 10^{-6}$  С;
- для коэффициента термического расширения 0,8...1,5 ккал/кг·С.

Изменением вида углеродных волокон, вводимых в полимер, их схемы армирования можно добиться существенного снижения коэффициента линейного термического расширения, поскольку для углепластика он в 15–20 раз ниже, чем у металлов (таблица 1).

Таблица 1. Значения коэффициента линейного термического расширения для материалов

Вид материала	КЛТР·10 <sup>6</sup> , 1/°С
Алюминий	23,8
Медь	16,5
Сталь	15,0
Высокопрочное графитированное углеродное волокно	0,08

Также углепластик является наиболее прочным материалом по показателям удельной прочности и жесткости по сравнению с другими наиболее распространенными материалами (таблица 2).

Одним из основных требований конструкции космического оборудования является обеспечение малой массы входящих компонентов. Удельный вес углепластика составляет 1,7 г/см<sup>3</sup>, что почти в 2 раза легче, чем у алюминия и почти в 5 раз меньше чем у стали. Таким образом, выбор данных материалов оправдан: основной слой представлен углепластиком, так как он обладает высокими прочностными характеристиками и

теплоустойчивостью, в сравнении стеклопластиком, так же с более низким КЛТР. Введение стеклопластической пластины в поверхностный слой, обеспечит уменьшение воздействия высоких температур, за счёт низкой теплопроводности. Данный слой так же играет роль диэлектрического покрытия, защищая токопроводящий углепластиковый каркас. Обеспечение равномерности размеров конструкции возможно благодаря пропорциональности КЛТР и размеров пластин. Очевидно, что данная конструкция не только прочна и размеростабильна, но и имеет более облегченную массу, в сравнении с использованием металлических материалов. Единственным минусом на сегодняшний день может стать высокая стоимость изготовления деталей из данных материалов.

Таблица 2. Основные физико-механические свойства применяемых материалов

Материал	Прочность при растяжении, МПа	Удельная прочность $e \cdot 10^3$ , км
Углепластик	780-1800	53-112
Стеклопластик	1920	91
Высокопрочная сталь	1400	18
Титановый сплав	1000	28

1. Проектирование адаптивного к действию градиентов температур размеростабильного корпуса космического телескопа. Ахметов, Р.Н., Сторож А.Д., Стратилатов Н.Р., Шайда А.Н., Нонин А.С., Потапова Ю.В., Кудрявцев О.Б. ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. №4 (42) 2013. – С.70–75.
2. Свойства углепластика и области их применения. Б.И. Молчанов, И.И. Гудимов. Всероссийский институт авиационных материалов / 1996-202215. Журнал «Авиационная промышленность» №3-4, 1997. – 10 с.

УДК 623.4.052.52:535.8

## ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЁСТКОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОЛЛИМАТОРНОГО ПРИЦЕЛА ЗАКРЫТОГО ТИПА

Фёдорцев Р.В.<sup>1</sup>, Ийд Кусай Мохамад<sup>1</sup>, Шкадаревич А.П.<sup>2</sup>, Фуфаев А.В.<sup>2</sup>, Рыжков С.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, <sup>2</sup>Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО» Минск, Республика Беларусь

Основным преимуществом коллиматорных прицелов закрытого типа по сравнению с классическими прицелами открытого типа является возможность их практического применения в сложных погодных условиях: интенсивный дождь, туман, мокрый снег и т.п. Заполнение внутренних полостей прицела азотом повышенной чистоты обеспечивает хорошее качество изображения и препятствует запотеванию оптических компонентов при перепадах температур.

Одним из современных прицелов данного вида, выпускаемых на предприятии НТЦ «ЛЭМТ» являются модель ПК-01ВС работающий в режиме

наведения на цель прямой наводкой. Вторая его модификация – модель ПКП-2С обеспечивающая работу в двух режимах: прямой наводки и прицеливание при стрельбе из-за горизонтальных и вертикальных защитных укрытий (гребни окопов, углы зданий, подоконники, стволы деревьев, камни и т.д.), за счёт применения сменной окулярной насадки с углом поворота 360° [1].

Коллиматорный прицел устанавливается на автоматы АК всех модификаций и другое автоматическое стрелковое оружие, имеющее посадочное место в виде направляющей планки типа «ласточкин хвост», расположенной на боковой поверхности ствольной коробки. Для

жёсткой фиксации прицела на оружии в конечном положении поворачивается рычаг зубчатого зажимного механизма (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид коллиматорного прицела модели ПК-01BC

Видимое увеличение в 1 крат обеспечивает реалистичность изображения цели в поле зрения и оценку расстояния до объекта наблюдения.

В оптической системе прицела исправлены ошибки параллакса совмещения прицельной марки, мушки и цели.

Функциональная схема прибора наведения приведена на (рисунок 2).

Конструктивно коллиматорный прицел выполнен в герметичном алюминиевом корпусе 1, внутри которого на подвижной оправе 2 вклеен телеобъектив 3 и лазерный диодный модуль 4 для формирования прицельной марки в точке О, находящейся в плоскости промежуточного изображения между положительной и отрицательной линзой объектива с антибликовыми покрытиями. Диодный модуль 4 установлен под углом 7 градусов к линии визирования и выведен за пределы световой зоны. Юстировка угла наклона оси в пределах  $\pm 10'$  обеспечивается поворотом оправы 2 относительно корпуса 1 за счёт вращения маховиков механизма выверки 5. Диапазон выверки в горизонтальном и вертикальном направлениях относительно плоскости направляющей планки составляет не менее  $\pm 1$  угл. град.

Герметичность оптической системы обеспечивается установкой в корпус 1 двух защитных смотровых окон 6 и 7 в независимых оправах, с нанесением на их резьбовые поверхности клея-герметика Multi Purpose Sealant

Dow Corning 732 и закладкой уплотнительных колец O-Ring NBR 872.

Прицел предназначен для работы, как в дневное, так и в ночное время с различным уровнем освещённости. Для обеспечения наилучшего контраста изображения прицельной марки на общем фоне в конструкции предусматривается 8 ступенчатое регулирование уровня яркости от «1» до «7» с равномерным её возрастанием. Максимальная яркость должна быть достаточной для того, чтобы видеть прицельную марку на светлом фоне, а минимальная яркость не должна ослеплять стрелка при прицеливании в сумерки. Прицельная марка выполнена в виде точки – RED DOT. «Точка» – самый технически простой и дешёвый вариант реализации, однако её сложнее заметить на фоне цели, так как она в большинстве случаев закрывает точку прицеливания. Более эффективным считается применение прицельной марки в виде перекрестия с разрывом, она лучше заметна, позволяет оценивать дальность до цели по соотношению угловых размеров цели и перекрестия.

Установка требуемого значения яркости обеспечивается поворотом маховика 8, который функционально связан с элементами платы управления 9. Источником питания лазерного диодного модуля 4 является одна аккумуляторная батарея 10 типа AA с номинальным напряжением  $1,5 (1,2) \pm 0,01$  В. При максимальном значении уровня яркости (положение «К») обеспечивается потребление тока на уровне 4 мА. В выключенном режиме (положение «0») ток составляет 6 мкА – обеспечивается функционирование только платы управления.

По итогам проведения серии лабораторных испытаний коллиматорного прицела ПК-01BC на вибростенде модели ВЭДС-1500 были выявлены дефекты в виде локального осыпания смазки «Протон» в местах установки оптических деталей. Анализ конструкции прицела показал, что причиной выкрашивания смазки послужила значительная величина зазоров в деталях шарнирного механизма, послуживших катализатором для возникновения вибраций.

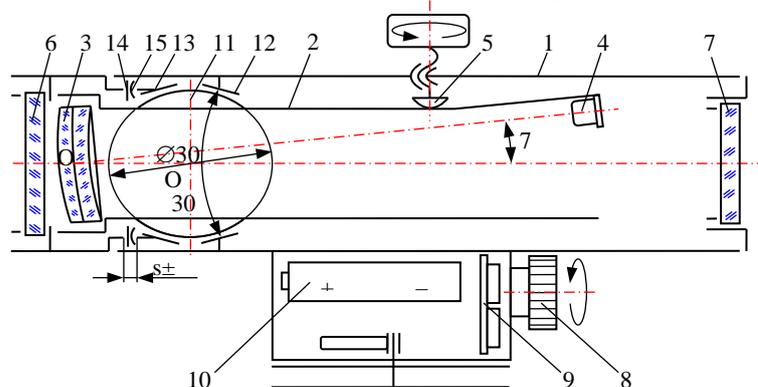


Рисунок 2 – Функциональная схема коллиматорного прицела модели ПК-01BC

При юстировке прицела необходимо обеспечить оптимальный баланс между усилием, прикладываемым к маховикам 5 механизма выверки и усилием, прикладываемым при закручивании оправы компонента 6, обеспечивающего деформацию пружины 15. В соответствии с рекомендациями [2] и с учётом эргономических требований предъявляемых к измерительным оптическим приборам, величина крутящего момента на рукоятках точной настройки  $\varnothing 19$  мм находится в пределах 2,3...5,0 Н·м. Этого усилия вполне достаточно для плавной работы резьбового соединения винт-гайка механизма выверки с посадкой М5-6Н/г6 (II класс точности), обеспечивающей суммарную величину зазоров:

$$\Delta_{5\min} = 0,004 \text{ мм и } \Delta_{5\max} = 0,020 \text{ мм.}$$

В подвижном шаровом шарнирном соединении наружной полусферы 11  $\varnothing 30$  мм и двух установочных колец 12 и 13 с внутренними коническими поверхностями, суммарная величина зазоров составит:

$$\Delta_{11\min} = 0 \text{ мм и } \Delta_{11\max} = 0,294 \text{ мм.}$$

Для деталей коллиматорного прицела проведен расчёт размерной цепи в осевом направлении, который показал, что для компенсации ширины замыкающего звена необходима установка промежуточного кольца 14

толщиной  $s_{14} = 0,4$  мм и пружинной шайбы 15 толщиной  $s_{15} = 2,0$  мм. Функциональные свойства пружинного кольца 15 будут соблюдаться при обеспечении условия максимальной величины его деформации  $f_{15} \leq 1/2s_{15}$ . Исходя из усилия, прикладываемого к оправе компонента 6 (34 Н), материала пружинного кольца (Сталь 65Г) и равновесного состояния всей юстируемой системы  $f_{15\max} \sim 0,95$  мм.

При сборке требуемая толщина прокладки 14 и пружинной шайбы 15 подбираются селективно из заранее подготовленного комплекта.

Коллиматорный прицел дополнительно может комплектоваться телевизионным прицелом с защищенным радиоканалом, наглазным дисплеем с индикацией, адаптивным прикладом специальной конструкции.

1. Прицел коллиматорный перископический ПКП-2С с комплектом доработки оружия: каталог / Продукция / Оптические и оптоэлектронные изделия / Прицелы коллиматорные для стрелкового оружия. Холдинг «БелОМО». 2010 – 2017. ОАО "БелОМО – ММЗ имени С.И. Вавилова". [http://belomo.by/catalog/optical-and-opto-electronic-products/priceli\\_kollimatornie\\_dlya\\_strelkovogo\\_oruziya/pkp\\_2c](http://belomo.by/catalog/optical-and-opto-electronic-products/priceli_kollimatornie_dlya_strelkovogo_oruziya/pkp_2c).
2. Справочник конструктора опτικο-механических приборов / Под общ. ред. В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.

УДК 62-67:004.946: 303.732.4

## МЕТОД ИМИТАЦИИ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Чернавчиц Д.А., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В результате интенсивного развития сферы информационных технологий происходит постоянное усовершенствование сопутствующих технических устройств, особенно в области игровой и мультимедийной продукции. Основной задачей становится слияние виртуального и реального мира в единое пространство. Общеизвестно, что классические сферы развлечения обеспечивают передачу информации через зрение 80% и слух 16%. В настоящее время разработано значительное количество устройств виртуальной реальности, однако фактически большинство из них ограничены возможностями создания 3D эффекта, т.е. обеспечивают только просмотр объёмного изображения. Технология 5D базируется на тактильных ощущениях и задействует: обоняние, осязание и вкус. Однако, для «полного погружения» в мир виртуальной и дополненной реальности необходимо также учитывать ещё четыре чувства: термощецию – чувство тепла (или его отсутствия) на нашей коже; эквибриощецию – чувство равновесия, которое определяется содержащими жидкость

полостями в нашем внутреннем ухе; ноциощецию – восприятие боли кожей, суставами и органами тела; проприощецию («осознание тела») – понимание того, где находятся части нашего тела, даже мы не чувствуем и не видим их [1].

Концепция разработки виртуальных очков развивается в двух направлениях: относительно недорогие модели рассчитаны для совместной работы со смартфонами и профессиональные модели такие как: Oculus CV1 и Rift DK2, Sony PlayStation VR, HTC Vive имеют собственный встроенный экран. За счёт близкого расположения экрана относительно глаз обеспечивается относительно небольшой угол обзора 85...110°. В различных вариантах исполнения устройства снабжаются встроенными датчиками акселерометра, гироскопа, приближения и магнитным датчиком. Разработаны также комбинированные устройства виртуальной реальности (очки HTC Vive & перчатки Manus VR) основанные на технологии позиционного отслеживания Lighthouse (рисунок 1). Перчатки имеют восьмичасовое время автономной работы и

программируемый вибрационный двигатель для тактильной обратной связи, а также SDK с открытым исходным кодом [2].



Рисунок 1 – Комплект оборудования для системы виртуальной реальности

Сущность предлагаемого метода заключается в том, чтобы позволить человеку дополнительно ощущать тепло, испускаемое виртуальными искусственными и биологическими объектами: открытый огонь, пламя костра, вспышка от взрыва или тепло живого существа. Алгоритм работы программного модуля представлен на рисунке 2.

Определение координат наблюдателя в пространстве осуществляется через систему внешних датчиков распределённых по периметру помещения и подключённых через внешние интерфейсы к PC (рисунок 3).

В качестве источников формирования теплового воздействия целесообразно использовать миниатюрные ИК излучатели, представляющие собой источники инфракрасного излучения модулируемые электрическим сигналом. Их принцип работы основан на работе резистивного нагревающего элемента установленного на тонкую диэлектрическую мембрану.

Биологическое действие лучистого тепла имеет ряд особенностей:

- прогревание более глубоких слоев кожи;
- образование в тканях биологически активных веществ (пирогенных), способствующих повышению температуры тела в органах за счёт усиления обмена веществ.

Однако при этом необходимо учитывать, что для органов зрения инфракрасные лучи, представляют опасность особенно в интервале волн длиной 0,7–15 мкм. Исследования Lengrand J.C. показали, что излучения с длиной волны 1,0–1,9 мкм особенно сильно нагревают хрусталик и водянистую часть глаза. Хилл, кроме того, указывает, что лучи с длиной волны больше 2,0–3,0 мкм вызывают стеснение дыхания и явления плохого самочувствия. Авторы [3] приводят следующие рекомендации Henschke С.І. по допустимой плотности (дозе) облучения при

излучении с различной спектральной характеристикой (таблица 1).



Рисунок 2 – Алгоритм работы термоощущения

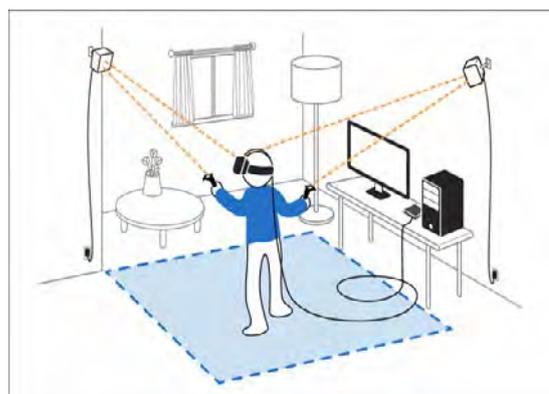


Рисунок 3 – Схема размещения датчиков

Таблица 1. Максимально допустимые дозы облучения для человека в диапазоне длин волн

Область спектра, мкм	Максимально допустимая плотность облучения, кал/см <sup>2</sup> ·с	Поглощённое излучение в кал·см <sup>2</sup> /с
0,7–8,0	1,15	1,08
0,7–3,0	1,62	1,49
0,3–3,5	1,71	1,54
0,6–1,3	3,17	2,38

Время переносимости тепловой радиации уменьшается с увеличением длины волны и её интенсивности. Таким образом, ИК-датчики целесообразно размещать внутри перчаток или внутри корпуса очков на лобной и височной части (рисунок 4).



Рисунок 4 – Схема размещения ИК-излучателей на очках HTC Vive

Основные технические характеристики наиболее подходящих моделей ИК-излучателей на кристалле AlGaAs компаний Lite-On и Hewlett-Packard представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные технические параметры ИК-излучателей

Модель	Исполнение	$2\beta, ^\circ$	Сила осевого излучения, мВт/ср
HSDL-4220	Светодиод 5 мм (T-1 3/4)	30	38
HSDL-4230		17	75
HSDL-4400	2×2 мм SMT	110	3
HSDL-4420		24	17

Рассматриваемые модели работают на длине волны  $\lambda = 875$  мкм и отличаются низким энергопотреблением: прямое напряжение 1,5 В при  $I_{FDC} = 50$  мА [4] [5].

1. Т. Кривомаз Сколько у человека чувств? Журнал «Фармацевт практик», №7-8 (127), 2014. С.16-17. [https://issuu.com/kseppp/docs/fp\\_07-08\\_2014](https://issuu.com/kseppp/docs/fp_07-08_2014)
2. The Manus VR Glove is a high-end data glove that brings intuitive interaction to virtual reality. Manus VR. 2017. <https://manus-vr.com/>
3. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. Пер. с нем. Под ред. И.Б. Левитана. М.–Л.: Госэнергоиздат. 1963. – 278 с.
4. HSDL-44xx IR Emitter Series. Lite-On Technology Corporation. 2007. [http://www.mouser.com/ds/2/239/P\\_100\\_HSDL-44xx%20DS%205989-3134EN%20Dec07-337162.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/239/P_100_HSDL-44xx%20DS%205989-3134EN%20Dec07-337162.pdf).
5. HSDL-42xx. Hewlett-Packard Co. 1999. [http://www.mouser.com/ds/2/239/LiteOn\\_HSDL\\_4220\\_4230-195195.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/239/LiteOn_HSDL_4220_4230-195195.pdf).

УДК 623.4.052.52:535.8

## ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРЁХОСЕВОЙ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДВЕС ДЛЯ ВИДЕОКАМЕР

Аксеник А.С., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

У электронного стабилизатора камера и ручка, за которую его удерживают, соединены двумя рамками, расположенными перпендикулярно друг другу. Между рамками присутствуют три шарнира, приводимых электромоторами. Каждый из этих электромоторов удерживает камеру от поворота по одной из трех осей. Эти три оси обычно называют по терминологии авиации:

Крен – наклон камеры влево-вправо.

Тангаж – наклон вперед-назад.

Рысканье – поворот вокруг вертикальной оси.

Также в конструкцию стабилизатора входят гироскопы, которые, собственно, определяют стремление камеры вращаться вокруг этих осей.

Из этого всего понятно, что даже в простейшем виде электронный стабилизатор представляет собой высокотехнологичное устройство, возможности которого раньше можно было реализовать только за очень большие деньги.

Операторы и режиссеры кино воодушевились, когда три года назад появились первые электронные системы стабилизации. Кадры,

прежде требовавшие дорогого оборудования, теперь можно было снять с относительно небольшим бюджетом. Некоторые из них, ранее казавшиеся практически невыполнимыми, теперь стали почти что простыми.

Тем не менее система стала жертвой множества проблем, свойственных первым поколениям продуктов. Настройка стабилизатора занимала целую вечность, а на его перезагрузку при замене аккумуляторов уходило драгоценное съемочное время. Расположение кабелей казалось небрежным, они часто цеплялись за предметы, останавливая съемку, при этом их внутренние элементы оголялись, подвергаясь воздействию окружающей среды. Первые версии были неплохими стабилизаторами, но иногда больше напоминали бета-версию, чем законченный продукт.

Кажется, компания, которая сделала электронные стабилизаторы популярными, поможет им пережить эволюцию. На решения, которые приняла iflight, явно повлияли операторы.

Прокладка кабелей.

Благодаря внутренней прокладке кабелей стабилизатор стал не только приятнее на вид (по крайней мере теперь ясно, что над его дизайном кто-то работал, а не просто собрал его где-то в гараже) — вероятность того, что он будет цепляться за предметы во время сложного движения камеры также снизилась. Модель гораздо лучше защищена от суровой погоды, а ее настройка станет ощутимо проще.

Кроме того, перезагрузка системы теперь происходит за две секунды, так что вы уже вряд ли пропустите нужный кадр в ожидании, когда он будет готов к работе.

Стабилизатор способен снабжать камеру питанием напрямую, так что вам не надо будет переживать о других аккумуляторах во время съемки.

Чтобы ускорить подготовку стабилизатора к работе, в системе предусмотрен режим автонастройки, который способен производить калибровку модели каждый раз, когда меняется положение или вид камеры.

Судя по всему, — это шаг вперед для электронных стабилизаторов для мобильных камер.

Главное достоинство конструкции — её компактность и небольшой вес. У подвеса складная ручка, что позволяет перевозить его в небольшой сумке или коробке. Размеры в сложенном состоянии — 35×30×5 сантиметров. Двух аккумуляторов 18650 хватает на несколько часов работы. Элементы подвеса не загораживают дисплей камеры. Подвес оснащен

джойстиком для панаромирования с фиксированной скоростью, что особенно важно для видеосъемки в путешествиях.

\* контроллер подвеса — SimpleBGC 32-bit.

\* 3 мотора Rctimer GBM2804 Hollow Shaft Brushless Gimbal Motor. Их мощности хватает для работы

\* джойстик ;

\* два защищенных литиевых аккумулятора 18650

\* кнопка с длинным шпильком 11 мм;

Конструкция подвеса

Алюминиевая конструкция состоит из трех консолей: ROLL, PITCH и YAW. Их необходимо вырезать из пластины дюралюминия толщиной 3–4 мм и согнуть. Мы использовали обычный алюминий 4 мм, жесткости которого вполне хватает. В креплении всех трех моторов закладывается возможность тонкой подстройки баланса.

Электронная часть подвеса

Джойстик. К джойстику необходимо припаять гибкие и тонкие провода. Мы использовали кабель МГТФ.

Рокерный выключатель. К нему тоже необходимо припаять один провод длиной 20 см (с расчетом на то, что он пойдет сразу к плате) и один короткий провод, для соединения с выключателем.

Для аккумуляторов 18650 необходимо согнуть контактные площадки из листовой латуни, меди или любого другого паяющегося материала. Также можно купить уже готовые пружины для контактов.

УДК 535.317

## АФОКАЛЬНАЯ АНАСТИГМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗ ТРЕХ ЗЕРКАЛ

Артюхина Н. К.<sup>1</sup>, Пероса Лаура<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Universidad Yacambú, Barquisimeto, Venezuela

Развитие новых оптико-электронных приборов налагает определенные требования на выбор схемных решений оптики. В настоящее время на передовые позиции выходит зеркальная оптика, т.к. возросли требования к расширению спектрального диапазона и снижению весовых характеристик оптических систем.

Среди различных типов по использованию зеркальных систем афокальные зеркальные системы нашли широкое применение при проектировании схем составных телескопов с синтезированной апертурой, состоящих из нескольких телескопических секций фокусирующего объектива [1, 2]. Кроме того, они могут использоваться как оптические системы афокальных насадок к фото-кинообъективам, тепlopеленгаторов, оптических устройств

лазеров. В геодезических приборах для систем регистрации удаленных объектов успешно применяют зеркально-линзовые афокальные насадки.

При малых углах поля зрения целесообразно использовать афокальные системы Мерсенна, составленные из двух зеркальных параболоидов [3, 4]. Отметим, что в них не исправлена кривизна изображения. Комбинируя несколько отражающих поверхностей, используя сферические и несферические зеркала, можно исправить большее число aberrаций и получить лучшее качество изображения.

Трехзеркальные системы интенсивно изучаются, и в этой области можно ожидать много новых интересных и перспективных решений.

В работе рассмотрена трехзеркальная афокальная система, обладающая хорошими габаритными параметрами и обеспечивающая апланатическую и анастигматическую коррекцию aberrаций 3-го порядка. Система содержит три силовых отражающих компонента, первый из которых – вогнутое параболическое зеркало, второй – вогнутое эллиптическое зеркало, а третий выпуклое параболическое зеркало (рисунок 1).

Первое и второе зеркало представляют собой объектив (классическая схема Грегори). Наличие промежуточного изображения дает возможность устранить лучи постороннего света с помощью диафрагмы, роль которой выполняет отверстие в третьем компоненте.

Трехзеркальная афокальная система изображена на рисунке 1.

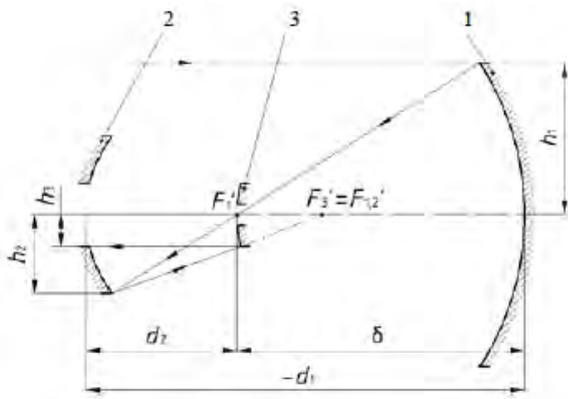


Рисунок 1 – Афокальная система из трех зеркал

Воспользуемся обозначениями углов и высот нулевого луча, а также показателей преломления и осевых расстояний с учетом правила знаков; для габаритного расчета примем алгебраический метод расчета оптических систем. Представим алгоритм параметрического расчета.

1. Определим условия нормировки, задав углы и высоты нулевого луча:

$$\alpha_1 = \alpha_4 = 0; \quad h_1 = 1, \quad (1)$$

$$\alpha_2 < 0; \quad h_2 = \frac{1 + \alpha_2}{\alpha_2 - \Gamma}$$

$$\alpha_3 = -1; \quad h_3 = \frac{1}{\Gamma}$$

2. Вычисляем угол  $\alpha_2$  по заданному значению видимого увеличения  $\Gamma$  по формуле

$$\alpha_2 = \frac{3\Gamma \pm \sqrt{\Gamma(5\Gamma + 4)}}{2(1 - \Gamma)} \quad (2)$$

Формулу (2) используем для определения высоты  $h_2$ .

3. Вычисляем расстояние между зеркалами  $d_1$  и  $d_2$  по формулам:

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\alpha_2}; \quad d_2 = \frac{1 - \Gamma h_2}{\Gamma} \quad (3)$$

4. Определяем радиусы поверхностей по формулам:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}; \quad r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4} \quad (4)$$

5. Проводим коррекцию aberrаций в области aberrаций 3-го порядка. В результате проведенной анастигматической коррекции aberrаций 3-го порядка получены деформации зеркал  $\sigma_s = -e^2$  (они определены квадратом эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка зеркальных поверхностей).

Для параболической формы зеркал  $\sigma_1 = \sigma_3 = -1$ .

Эксцентриситет меридиональной кривой второго порядка эллиптической поверхности определен значением:

$$-\sigma_2 = e^2 = \frac{1 - \alpha_2}{1 + \alpha_2} \quad (5)$$

Проведено компьютерное моделирование в программных средах Orpal и Zemax рассчитанной трехзеркальной афокальной системы для углового поля зрения  $2\omega = 1^\circ$ , диаметра входного зрачка  $D = 500\text{мм}$ , относительного отверстия системы Грегори  $D : f'_{1,2} = 1:2$  и видимого увеличения  $\Gamma = -4^x$ .

Значения остаточных aberrаций в данной системе, полученные в ППП Orpal, даны в таблице 1 ( $Z'_m, Z'_s$  – кривизна изображения,  $\Delta Y'$  % – дисторсия).

Таблица 1 – Абберационные характеристики трехзеркальной системы

	$\Delta Y'$ %	$Z'_m$	$Z'_s$
-4 <sup>x</sup>	0,1219	0,0068	0,0068
	0,000	0,000	0,000

Конструктивные параметры и уравнения отражающих поверхностей представлены следующими значениями.

Первая поверхность  $y^2 + z + 2000x = 0$ .

Вторая поверхность  $y^2 + z^2 - 666.667x + 0,889x^2 = 0$ .

Третья поверхность  $y^2 + z + 1000x = 0$ .

Результаты компьютерного моделирования, выполненные в ППП Zemax, представлены на рисунке 2.

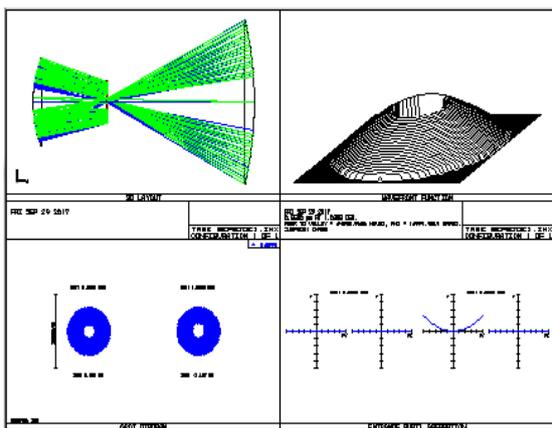


Рисунок 2 – Компьютерный расчет афокальной системы из трех зеркал в ППП zetaх.

Установлено, что рассчитанные системы обладают хорошим качеством изображения с учетом aberrаций высшего порядка и просты в технологическом отношении. Они могут

применяться в качестве афокальных насадок к линзовым объективам, работающим в различных областях спектра. К тому же они могут найти применение в оптических системах с синтезированной апертурой, а при разъюстировке афокальных систем такого типа можно получить длиннофокусные объективы с высоким качеством изображения.

1. Цуканова Г.И. Оптические системы телескопов с синтезированной апертурой / Г.И. Цуканова // Оптический журнал. – 1994. – № 9. – С. 28–31.
2. Puryayev D.T. Concept for a telescope optical system with a 10-m-diamspherical primary mirror / D.T. Puryayev // Optical Engineering. – 1996. – Vol. 35.No. 7. – P. 2017–2020.
3. Русинов, М.М. Несферические поверхности в оптике: Расчет, изготовление и контроль. 4-е изд.– М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 296 с.
4. Артюхина Н.К, Лаура Пероса, Лус Самбрано. Квартпараболическая система из трех зеркал. Материалы 8-й международной НТК «Приборостроение – 2015», г. Минск, 25-27.11.2015. – Минск: БНТУ, 2015.– С.165–167.

**Секция 5. УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ И ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ  
ДЛЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 004

**«ПЕРЕВЁРНУТАЯ» МОДЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ  
ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ**

**Воронина М. В., Мороз О. Н.**

*Санкт-Петербургский горный университет  
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

«Перевёрнутый класс» представляет собой обучающую стратегию и тип смешанного обучения, который изменяет традиционную среду обучения, предоставляя большую часть обучающего контента онлайн, вне класса. Деятельность, которая традиционно считается домашней работой, перемещается в аудиторию. Джонатан Бергман и Аарон Сэмс - основатели «перевёрнутой» модели обучения (FLM). Это два учителя, которые в 2007 году впервые обеспечили спортсменов, часто пропускающих занятия, своими онлайн лекциями. Затем они превратили эту идею в новое образовательное направление [1]. Книга Джейсона Бретцмана является отличным ресурсом, который поможет вам ответить на некоторые из вопросов, возникшие после того, как вы решили «перевёрнуть» класс [2]. FLM — это педагогический подход, при котором обучение переходит от группового учебного пространства к индивидуальному учебному пространству, а образовавшееся аудиторное групповое пространство превращается в динамичную интерактивную среду обучения, где преподаватель является наставником студентов, а они исследовательски и творчески участвуют в изучении дисциплины [3].

Цель исследования состояла в том, чтобы понять текущее состояние дел и практику использования ИКГ FLM, и сформировать наше собственное мнение. В результате этот метод в нашем понимании развился как уникальное сочетание теорий преподавания, которые ранее считались несовместимыми:

– активное обучение, построенное на конструктивистской идеологии, ключевая идея которой заключается в том, что знание не может быть передано учащемуся в окончательной форме, но возможно создание педагогических условий для успешного самостоятельного роста знаний студентов.

– предварительно записанные образовательные лекции и разработанные электронные учебные пособия, основанные на необихевиристических (поведенческих) принципах.

Несмотря на то, что нами был осуществлён обзор более чем 87 исследований, мы не обнаружили существенных исследований в области ИКГ FLM [4].

Некоторые родственные исследования FLM приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты систематического обзора

№	Course	Author, year
1	Mathematics, Linear Algebra	Kay & Kletskin, 2012; Ingram et.al, 2014; Love et al., 2014; Talbert, 2014; Zengin, 2017
2	Upper-division engineering	Mason, Shuman & Cook, 2013
3	Fluid Mechanics	Mcclelland, 2013
4	Information Systems	Mok, 2014
5	Computer Programming	Puarungroj, 2016
6	Computer Engineering	Redekopp & Ragusa, 2013
7	Mathematics Software	Zengin, 2017
8	Software Engineering	Gannod, Burge & Helmick, 2008; Choi, 2013
9	Introductory programming (CS1) to engineering, engineering technology, and software engineering undergraduates	Campbell, 2014; Amresh, 2013
10	Mechanics of Materials	Lee, Zhu & Middleton, 2016; Thomas & Philpot, 2012
11	Electrical Engineering	Bland, 2006; Kaleem, Jacobson & Khan, 2016
12	Geological Engineering	Hagen & Fratta, 2014
13	Biomedical Engineering	Ankeny & Krause, 2014
14	Materials Science. Solar Cells, Fuel Cells and Batteries: Materials for the Energy Solution	Clemens et al., 2013
15	Mid-level undergraduate engineering course	Bishop & Verlegere, 2013
16	Undergraduate circuits analysis	Rockland, 2013
17	Undergraduate statistics	Wilson, 2013
18	Undergraduate course for Information Systems	Mok, 2014
19	Flexible work-based learning to engineering postgraduate students	Simpson et al., 2003
20	STEM	Talbert & Valley, 2012
21	Large Systems Design Class	Bailey & Smith, 2013

FLM педагогика способна хорошо работать по целому ряду математических, а также по другим STEM курсам и поощряется растущим национальным интересом к такой педагогике, которая, несомненно, приведет к новым представлениям, стратегиям и инструментам (McGivney-Burelle, 2013).

Веб-сайт Flipped Network (FLN) содержит ссылки на видеоролики, которые могут использовать преподаватели, объявления о событиях, связанных с FLM, архивированные вебинары и т.д. В Flipped Network размещено Flipped Learning Community (FLC), которое объединяет 25 000 преподавателей со всего мира, которые обмениваются ресурсами и передовыми методами; учителя могут бесплатно присоединиться к FLC (Kostka & Lockwood, 2015).

Большинство исследователей отмечают несомненные достоинства перевернутого обучения (Zhukovskiy, V.E., 2017; Rutherford, R. & Rutherford, J., 2013; Herreid & Schiller, 2013; Hamdan et al., 2013; Chao, Chen & Chuang, 2015) [5]. Студенты в перевернутом классе чувствуют, что они узнали больше, чем в традиционной аудитории (Touchton, 2015). Ученики переходят от пассивных получателей информации к активным оценщикам и пользователям информации, а инструктор переходит от безличного преподавателя к вовлеченному тренеру. Классная среда переходит от транзакционной модели к реляционной (Talbert & Valley, 2012). Студенты признали, что этот подход мотивирован тем, что позволил добиться большей дифференциации обучения (Davies, Dean & Ball, 2013). Студенты сообщили, что они удовлетворены курсом, их посещаемость улучшилась (Chen et al., 2014). Студенты демонстрируют лучшую индивидуализацию, чем в традиционном классе, и проявляют повышенный интерес к совместному обучению (Chiang & Wang, 2015).

В случае перевернутого обучения роль, назначаемая профессору, также изменяется в свою очередь. Вместо того, чтобы стать «мудрецом на сцене», инструктор теперь становится «проводником», представляя роль профессора роли когнитивного тренера (Berrett, 2012), контакт студентов с преподавателями

может быть уменьшен на две трети (Baerler, Walker & Driessen, 2014). Инвертированная парадигма рассматривает ученика как активного ученика, который реконструирует знания из информации (Ван Вин, 2013 год, Ivala, Thiart & Gachago, 2013; Berrett, 2012 Gannod, Burge & Helmick, 2008).

Исследователи также отмечают трудности. Преобразование курса в перевернутый формат требует серьезных инвестиций времени от профессоров, требует приверженности и поддержки администраторов (Drake, Kayser & Jacobowitz, 2016; Puarungroj, 2016). Этот метод влечет за собой высокие затраты на запуск (Rockland et al., 2013). Также необходимо уделять больше внимания подготовке преподавателей. (Rodrigues & Mouraz, 2014). Результаты студентов на экзаменах не всегда лучше результатов других студентов (Canino, 2015).

Некоторые авторы не верят, что будет какая-то подходящая замена для старомодного решения проблем, и они не верят, что видео сделают учителя менее релевантными или важными в развитии ученика (Chetcuti, Thomas & Pafford, 2014).

Успех перевернутого подхода зависит от синергии между преподавателем и студентом, требует постоянной мотивации и вклада до, во время и после живого обучения. При надлежащем использовании FLM является ценным дополнением к практике высшего образования (Estes, Ingram & Liu, 2014).

1. Bergmann, J. & Sams, A. (2014). Flipped Learning: Gateway to Student Engagement. p.182.
2. Bretzmann, J. (2013). Flipping 2.0: Practical Strategies for Flipping Your Class, p. 328.
3. Flipped classroom. (2017, June 6). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved June 19, 2017 from [https://en.wikipedia.org/wiki/Flipped\\_classroom](https://en.wikipedia.org/wiki/Flipped_classroom).
4. Voronina, M. V., Moroz, O. N., Sudarikov, A.E., Rakhimzhanova, M.B., Muratbakeev, E. Kh. (2017). Systematic review and results of the experiment of a flipped learning model for the courses of descriptive geometry, engineering and computer graphics, computer geometry. *Eurasia journal of mathematics, science and technology education*, 13(8),4831-4845.
5. Zhukovskiy, V.E. (2017). Study of network technologies in the "flipped class". *Proceedings of the IV International Scientific and Methodological Conference, Saint-Petersburg, Russia: Saint-Petersburg Mining University*, 1, 16-24.

УДК 330.322

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛА МЕНЕДЖМЕНТА С УЧЕТОМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Гурко А.И.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Функции менеджмента, а соответственно и методы их реализации постоянно модифицируются и углубляются в связи с усложнением содержания работ, выполняемых в соответствии с

их требованиями. Представление цикла менеджмента в виде формальных схем от А.Фуйоля получило свое развитие в работах В.В.Кондратьева [1] и авторского коллектива под

руководством В.Н.Буркова [2]. Этапы или функции управленческого цикла они рассматривают в виде циклически повторяющейся последовательности, представленной на рис. 1.

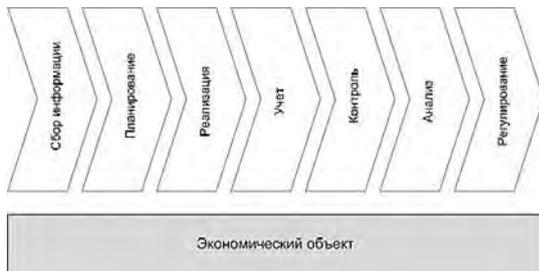


Рисунок 1 – Типовые этапы цикла управления в модели СПРУКАР

Цикл управления СПРУКАР, включает в себя:

- С – *сбор* и анализ информации для принятия управленческого решения;
- П – *планирование* действий – разработка и принятие управленческого решения;
- Р – *реализация* – организация и исполнение управленческого решения (в т.ч. мотивация исполнителей);
- У – *учет* фактически полученных результатов реализации управленческого решения;
- К – *контроль* – сравнение фактического и запланированного результата;
- А – *анализ* – выявление и изучение причин отклонения фактических от запланированных результатов;
- Р – *регулирование* хода исполнения управленческого решения, коррекция (при необходимости) ранее принятых решений (в том числе применение к исполнителям предусмотренных мотивационных воздействий с целью усиления выявленных положительных тенденций и нейтрализации отрицательных).

Этапы управленческого цикла можно трактовать как основные функции менеджмента экономического объекта. В реализации этих функций частично задействован менеджмент и частично экономический объект.

Как было показано ранее [3], замена этапов *учет, контроль и анализ* в цикле управления СПРУКАР на этап *диагностирование* дает возможность оценки принимаемым решениям, опираясь на понятия: *используемая система диагностирования, показатели и характеристики диагностирования* [4], делает выполнение функции *регулирование* более обоснованным и эффективным.

Моделирование конкретного экономического объекта сводится к заданию его состояний, начиная с момента создания и кончая ликвидацией или поглощением другим экономическим объектом. На состояние

реального экономического объекта накладываются ограничения – некоторые внутренние и внешние факторы (ограничения деятельности). Возможные состояния реального экономического объекта образуют в пространстве состояний некоторую подобласть (подпространство) – множество допустимых состояний объекта.

Моделирование объекта диагностирования включает формальное определение структуры его элементов и их возможных состояний. Нормативный (эталонный, беспроблемный) или проблемный экономический объект может быть представлен как динамическая система, состояние которой в каждый момент времени  $t$  определяется значениями внутренних, входных, и выходных показателей.

К показателям внутреннего состояния экономического объекта как объекта диагностирования можно отнести:

- показатели состояния основных фондов;
- показатели финансового состояния объекта;
- показатели состояния производственного и вспомогательного персонала;
- показатели состояния косвенных затрат объекта;
- показатели производственных возможностей объекта и т.д.

Множество значений используемых показателей внутреннего состояния объекта представим в виде  $m$  – мерного вектора состояния, содержательно выполняющего функцию памяти объекта

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_m).$$

К показателям входных внешних воздействий на экономический объект отнесем:

- плановые показатели;
  - показатели величины поступивших ресурсов для выполнения плана;
  - показатели стимулирования в случае выполнения и невыполнения плана;
  - показатели состояния внешней среды объекта.
- Множество значений используемых показателей входных внешних воздействий представим в виде  $l$ -мерного вектора

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_l).$$

К выходным показателям экономического объекта отнесем:

- показатели фактического выполнения плана;
- показатели планового предложения будущих периодов.

Множество значений выходных показателей представим в виде  $k$ -мерного вектора, содержательно представляющего собой пользовательскую продукцию экономического объекта как некоторого технологического процесса

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_k).$$

Тогда

$$Y = \Psi(t, P_0, X)$$

определяет некоторую аналитическую, векторную, графическую, табличную или другую форму представления системы переходных функций нормативного объекта.

Обозначим:

$y$  – фактическое состояние экономического объекта (результат действия или результат деятельности в цикле менеджмента);

$Y$  – множество допустимых (возможных) состояний объекта, ограничения деятельности (например, производственные возможности),  $y \in Y$ ;

$s$  – сообщаемая экономическим объектом информация;

$S$  – ограничения на возможные сообщения,  $s \in S$ ;

$Y(s)$  – оценка менеджментом (на основе сообщенной информации  $s$ ) производственных возможностей  $Y$ ;

$Q(y, z)$  – цели менеджмента заданы целевыми критериями, состоящими из целевых требований  $z$  и показателей состояния  $y$ ;

$x = d(s) \in Y(s)$  – методы планирования, правила выбора оптимального плана при ( $x = y$ ) по критерию  $Q(x, z)$ , желательного с точки зрения менеджмента действия или результата деятельности экономического объекта;

$q = p(x, y)$  – показатели оценки деятельности, методы диагностирования результативности (деятельности) экономического объекта;

$\Delta x$  – оперативный менеджмент в виде корректировки планов;

$w = f(q)$  – функция стимулирования экономического объекта.

Менеджмент реализует собственные функции, а экономический объект реализует основные и обеспечивающие функции.

Для такого разграничения предлагается детализировать состав каждого этапа до такого уровня, что каждая подфункция может быть однозначно отнесена либо к менеджменту, либо к экономическому объекту. На таком уровне детализации подфункции приобретают черты *операции*. Далее можно создать модель типовых этапов цикла менеджмента с детализацией этапов и функций на операции и выделить операции менеджмента и операции экономического объекта.

УДК 658

## ОРГАНИЗАЦИЯ СТАРТАПОВ

**Журкевич М.В., Бурштын В.Э., Кравцова В.В.**  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В последние несколько лет такое явление, как стартап, стало достаточно популярным и часто обсуждаемым. Стартап – процесс реализации нового проекта или выводе на рынок нового продукта, для которого характерно начинание

*Механизмы менеджмента* представляют собой вышеперечисленные зависимости, т.е. решения принимаются в зависимости от получаемой по каналам обратной связи информации о действиях экономического объекта между: сообщением объекта и назначаемым ему планом - *механизм планирования*; результатом деятельности объекта и оценкой его деятельности - *механизм диагностирования*; действием объекта и размером его вознаграждения - *механизм стимулирования*, и т.д.

Каким образом достигается реализация принятых решений? На основе оценки менеджментом фактического состояния экономического объекта и запланированного целевого состояния. Такие оценки целесообразно делать с помощью экономической диагностики.

При использовании количественных показателей цикл менеджмента приобретает количественную детализацию [1], приведенную на рис. 2. При рассмотрении задач менеджмента важным является выделение в процессах деятельности роли менеджмента и экономического объекта и их ответственности за реализацию отдельных компонент деятельности.



Рисунок 2 – Модель цикла менеджмента

1. Кондратьев В.В. Проектируем корпоративную архитектуру. Навигатор для профессионала. – Изд. 2-е дополненное. – М.: Эксмо, 2007.
2. МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ: Учебное пособие / под ред. Д. А. Новикова. – М.: УРСС (Editorial URSS), 2011.
3. Гурко А.И. Диагностирование в цикле управления экономическим объектом. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2016. Материалы 9-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2016. – 426–427с.

бизнеса с «нуля», высокий уровень риска, неопределенность финансирования, необходимость быстрого продвижения проекта на рынке, а также профессиональная команда. Стартап – это настоящий современный тренд. Еще 30 лет назад мало кто представлял себе возможность создания

быстро, но очень прибыльного бизнеса, цикл жизни которого не превышает и года.

Понятие «стартап» происходит от английского start up – «запускать», оно пришло к нам из США, а точнее из Силиконовой долины, где в настоящий момент находится около 7 тыс. высокотехнологичных компаний, производящих продукцию сферы информационных технологий. Одна из первых стартап-компаний в Калифорнии была основана выпускниками университета Стенфорда Уильямом Хьюлеттом (William Hewlett) и Дэвидом Паккардом (David Packard), она известна сейчас как успешный бренд Hewlett-Packard [1].

Главное отличие стартапа от обычной компании – это инновационность идеи, вокруг которой он строится. Инновация – введенное в гражданский оборот или используемое для собственных нужд новшество, обеспечивающее качественный рост эффективности процессов или продукции, востребованной рынком. 10 июля 2012 г. был принят Закон Республики Беларусь № 425-3 «О государственной инновационной политике и инновационной деятельности». Действие настоящего Закона распространяется на отношения, связанные с осуществлением инновационной деятельности. Целью данной политики в Республике Беларусь является создание благоприятных социально-экономических, организационных и правовых условий для инновационного развития и повышения конкурентоспособности национальной экономики. Государственная инновационная политика формируется и осуществляется исходя из следующих основных принципов: свободы научного и технического творчества; защиты интеллектуальной собственности; направленности инноваций на достижение приоритетов социально-экономического развития Республики Беларусь; выделения бюджетных средств на конкурсной основе для реализации инновационных проектов. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь формируется сроком на пять лет [2].

Основным ресурсом для создания нового стартапа служит хорошая новаторская идея. Другим фактором успешности этой идеи является ее востребованность (степень необходимости для потребителя).

Началом работы над любым стартапом является создание его прототипа. Далее прототип превращается в полноценный продукт, трансформируется и развивается, многократно масштабируясь. Развитие стартапа традиционно делится на несколько стадий.

1. Посевная стадия (seed) – создание компании/проекта, формирование команды, проведение маркетинговых исследований, подготовка бизнес-плана.

2. Запуск проекта (start-up) – привлечение и обслуживание первых клиентов, продвижение на рынок механизмами рекламы и PR.

3. Этап роста (early growth) – привлечение средств для дальнейшего развития компании, формирование постоянной команды, увеличение числа клиентов.

4. Этап расширения (expansion) – завоевание большего сегмента рынка, формирование базы постоянных клиентов, дальнейшее привлечение инвестиций.

5. Этап выхода (exit) – закрепление компании на рынке, размещение на фондовом рынке [3].

Отношения основателя стартапа с инвестором – это партнерство, которое в большинстве случаев ведет к взаимной выгоде. На сегодняшний день инвестициями в стартапы занимаются бизнес-ангелы, венчурные фонды и гранты государства.

Венчурные фонды – это инвестиционные фонды, нацеленные на работу с инновационными предприятиями и проектами. Они вкладывают средства в ценные бумаги или доли предприятий с ожидаемой высокой прибылью. Венчурные фонды также вкладывают в молодые и перспективные начинания средства своих вкладчиков, например, деньги страховых компаний, пенсионных фондов, частных лиц и так далее, а также финансируют проекты обладающие высокой или средней долей риска, но при этом с неплохим потенциалом доходности.

В качестве индивидуальных инвесторов, которые самостоятельно определяют объект инвестирования и вкладывают в него свои собственные средства, выступают бизнес-ангелы. Их главная цель заключается в получении прибыли в долгосрочной перспективе, так как вложения в стартап-компанию является не основной их деятельностью и не единственным источником доходов. Существуют также биржи для стартапов и организации, финансирующие стартапы [4].

Одним из наиболее эффективных инструментов поддержки и развития предпринимательства является создание бизнес-инкубаторов, поскольку именно бизнес-инкубатор дает возможность заложить основы новой генерации субъектов малого предпринимательства и поддержать уже действующих предпринимателей. В технопарке БНТУ «Политехник» в 2016 году совместно с министерством науки и технологии Китая была достигнута договоренность о создании бизнес-инкубатора инновационных проектов в индустриальном парке «Великий камень». На базе «Политехника», как предполагается, и будут зарождаться стартапы, которые белорусско-китайский парк в последующем возьмет под своё

крыло. Площадка «Технопарк» была создана специально для того, чтобы идеи и технологии, рожденные на кафедрах и в лабораториях, вырастали до производства, коммерциализации и масштабирования [5].

Стартапы можно классифицировать по степени наукоемкости:

– стартапы, основанные на высоких технологиях: бизнес, построенный на новейших научных открытиях, может быть очень доходным. Чтобы запустить его, требуется серьезное финансирование, которое могут обеспечить только крупные инвесторы;

– традиционные стартапы: на самом деле, чтобы открыть успешный бизнес, не обязательно создавать инновационную идею. Некоторые стартапы формировались на базе нехитрых, легко реализуемых идей, и в результате сделали своих создателей состоятельными людьми.

Чаще всего стартапы появляются в сфере высоких технологий, потому что наибольшим потенциалом для масштабирования обладает интеллектуальная собственность – патенты, товарные знаки, авторские права и т.д.

Концепция авторских прав заключается в том, что автор изобретения имеет ряд прав на него. Авторские права – самый очевидный способ оформления интеллектуальной собственности без участия государства. Автор имеет право на коммерческое использование изобретения (продажу, копирование, исполнение за деньги – словом, любое получение прибыли); личные, неотчуждаемые права на него, которые нельзя передать даже при желании.

Патентное право по сравнению с авторским имеет иной механизм защиты. В то время как авторское право распространяется даже на бессмысленный набор знаков, патентное право требует конкретного работающего усовершенствования, то есть распространяется на содержание, а не на форму. Необходима регистрация для юридической защиты: если создатель зарегистрировал (запатентовал) свое изобретение, то он всегда

будет считаться правообладателем независимо от притязаний других лиц. Кто первым внесет данные в реестр, тот и будет абсолютным владельцем патента. В отличие от авторского права здесь не нужно никому ничего доказывать, если создатель уже попал в базу патентов. Сроки защиты у патентных прав меньше, чем у авторских – так результаты исследовательских работ скорее попадают в производство и улучшают жизнь людям.

Товарный знак примерно соответствует термину «бренд», только последний относится к экономической составляющей идентификатора, а товарный знак – к юридической. Существует реестр товарных знаков, в который можно занести название фирмы, продукта, их логотип, форму упаковки и даже (в некоторых странах) запах. Регистрация по одному или нескольким классам автоматически защищает ваш знак в соответствующей сфере деятельности [6].

По статистике средний возраст стартаперов – двадцать пять лет. В этом возрасте молодые люди амбициозны, целеустремлены, коммуникабельны и являются приверженцами принципа: или всё – или ничего. Развить стартап правильно возможно только при знании теории (развитие управленческих навыков, привлечение инвесторов, основные способы работы в команде), что обеспечит правильное и устойчивое развитие. Это актуально на сегодняшний момент, поскольку все большее количество людей желает развивать собственный бизнес, а не становиться наемным работником.

1. Черняк В.З. Управление инвестиционными проектами: учебное пособие для вузов. – М.: Юнити-Дана, 2012.
2. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. [электронный ресурс]. <http://www.pravo.by/document/?guid=3871&p0=h11200425>.
3. Аверченков В.И., Ваинмаер Е.Е. Инновационный менеджмент: учебное пособие для вузов. – М.: ФЛИНТА, 2011.
4. Чернов В.А. Инвестиционный анализ: учебное пособие. – М.: Юнити-Дана, 2012.
5. Бизнес на идеях [электронный ресурс]. URL: <http://gknt.gov.by/opencms/opencms/ru/v8einter>.
6. Янковский Р. М. Закон стартапа. – М.: Стартап, 2017.

УДК 51(07.07)

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИНФОРМАТИКА» СТУДЕНТАМИ ПСФ

Кондратьева Н.А., Романчак В.М., Гундина М.А., Прусова И.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Курсовая работа, как один из видов самостоятельной работы студентов, позволяет эффективно углубленно освоить разделы программы учебной дисциплины «Информатика». Основных целей курсовой работы можно достигнуть только тогда, когда она выполнена студентом творчески,

самостоятельно, на основе глубокого изучения научной и методической литературы, обобщения и анализа разностороннего фактического материала.

Задача преподавателя заключается в организации и направлении познавательной

деятельности студентов, эффективность которой во многом зависит от их самостоятельной работы. В свою очередь, та должна представлять собой не просто самоцель, а средство достижения прочных и глубоких знаний, инструмент формирования активности студентов.

Современной тенденцией в инженерных исследованиях и проектировании так же, как и в инженерном образовании является все более широкое использование компьютерного моделирования с целью максимального учета принципиально важных эффектов и оперирования полными математическими и информационными моделями объектов. Сегодня студент, а в будущем инженер-исследователь, не должен бояться нестандартных задач, сложных по реализации, задач, требующих не только решения, но и достижения оптимизации алгоритма, экономической и хозяйственной обоснованности полученного решения, достижения цели с учетом экономии ресурсов.

В первую очередь, преподавателю необходимо выявить начальный уровень готовности студента к выполнению курсовой работы, наметить дальнейшие этапы выполнения самостоятельной работы, осуществлять управление через воздействие на каждом шаге процесса выполнения курсовой работы.

В рабочей программе по информатике содержание курсовой работы по предмету определяется как создание математической или информационной модели какого-либо явления или технологического процесса. Для выданной в задании математической или информационной модели должны быть разработаны структуры данных, подобраны алгоритмы, написаны и отлажены программы и проведен анализ полученных результатов. Визуализация результирующей информации должна быть выполнена в табличной или графической форме. При создании математической модели необходимо осуществить выполнение следующих разделов: 1) анализ исходной информации; 2) выбор математического аппарата и программного обеспечения для получения качественных и количественных результатов; 3) построение укрупненной блок-схемы алгоритма программы; 4) написание и отладка программы; 5) сравнение полученных результатов и при необходимости уточнение и корректировка или обобщение модели.

Преподавателю следует давать методические рекомендации по выполнению курсовой работы, выявлять затруднения и типичные ошибки, подчеркивать положительные и отрицательные стороны, определять уровень продвижения студента и тем самым сформировать у него мотивацию достижения успеха в учебной деятельности. Во время подготовки курсовой

работы перед студентом не стоит задача открыть новые научные положения в области информатики. В процессе изложения темы студенту необходимо показать, как работать с научными источниками, способы поиска информации, обучить правилам логического изложения материала, умению систематизировать данные, обрабатывать фактический материал, делать обобщения и выводы, увязывать теорию с практикой и современной действительностью.

В «Методических указаниях к курсовым работам по информатике» для студентов инженерных специальностей приборостроительного факультета БНТУ изложены требования к выполнению и оформлению курсовых работ по дисциплине «Информатика» для студентов инженерных специальностей приборостроительного факультета БНТУ. В ходе выполнения курсовой работы студенты получают возможность закрепить знания и навыки по некоторым смежным дисциплинам, таким как физика, линейная алгебра, математический анализ, дифференциальные уравнения, численные методы, поскольку одним из разделов курсовой работы является математическое моделирование предметной области.

Важной задачей также является формирование умения грамотно оформлять пояснительную записку, делать презентацию и защищать результаты работы перед аудиторией.

Содержание и сроки выполнения отдельных этапов курсовой работы должны устанавливаться руководителем таким образом, чтобы в течение всего периода проектирования обеспечивалась равномерная недельная трудоемкость работ. При сдаче студентом готовых частей курсовой работы на проверку, для отслеживания хода курсового проектирования, предлагается к выполненным разделам прикладывать протокол консультаций, куда будут записываться замечания и рекомендации руководителя работы, что станет стимулом к успешному результату.

Предлагается использовать бланк оценки качества выполнения курсовой работы. В нем должны отражаться следующие положения: 1) оценка содержания работы: соответствие темы работы содержанию дисциплины; обоснование актуальности темы; соответствие содержания работы целям и задачам исследований; общая грамотность изложения; использование при оформлении аналитической части работы табличных и графических редакторов; актуальность и практическая значимость используемых источников; проверка работы на заимствования; 2) оценка качества выполненного исследования: соответствие структуры работы целям и задачам

исследований; наличие теоретической и практической части; проведение практических исследований по теме; написание программных кодов или использование пакетов для инженерных расчетов; анализ результатов исследований и выявление недостатков; актуальность выводов и предложений; полнота раскрытия заданной темы; 3) оценка качества оформления: соответствие структуры и объема работы предъявляемым требованиям; форматирование текста; требуемая нумерация страниц; оформление заголовков; оформление таблиц, графиков, рисунков, формул; наличие и оформление библиографических ссылок; оформление приложений.

Подведение итогов курсовой работы включает следующие этапы: сдача курсовой работы на проверку руководителю и выставление предварительной оценки в бланк оценки качества выполнения курсовой работы; доработка курсовой работы с учетом замечаний руководителя; сдача готовой курсовой работы на защиту; защита курсовой работы. Итоговую дифференцированную оценку выполненной курсовой работы выставляет комиссия, назначаемая распоряжением по кафедре в составе не менее двух преподавателей. Защита состоит из двух этапов: доклада студента и дискуссии, в которой студент отвечает на вопросы научного руководителя и комиссии. Руководитель определяет требования к содержанию и продолжительности доклада при защите, устанавливает регламент для дискуссии. Защита курсовой работы, как правило, состоит в коротком докладе студента продолжительностью 5–6 минут с использованием презентации (10–12 слайдов) и ответов на вопросы, которые могут поступить от членов комиссии по содержанию работы. В докладе рекомендуется отразить следующие моменты: личный вклад при раскрытии темы, основную цель работы, используемые методы при изучении рассматриваемой проблемы, новые результаты,

которые достигнуты в ходе исследования и основные выводы. Целесообразно соблюдение структурного и методологического единства материалов доклада и презентации к курсовой работе.

Оценки «10–9» выставляются при выполнении курсовой работы в полном объеме; работа отличается глубиной проработки всех разделов содержательной части, оформлена с соблюдением установленных правил; студент свободно владеет теоретическим материалом, убедительно защищает свою точку зрения.

Оценки «8–7–6» выставляются при выполнении курсовой работы в полном объеме; работа отличается глубиной проработки всех разделов содержательной части, оформлена с соблюдением установленных правил; студент твердо владеет теоретическим материалом, может применять его самостоятельно или по указанию преподавателя; на большинство вопросов даны правильные ответы, защищает свою точку зрения достаточно обосновано.

Оценки «5–4» выставляются при выполнении курсовой работы в основном правильно, но без достаточно глубокой проработки некоторых разделов; студент усвоил только основные разделы теоретического материала и по указанию преподавателя применяет его практически; на вопросы отвечает неуверенно или допускает ошибки.

Оценки «3–2–1» выставляются, когда студент не может защитить свои решения, допускает грубые фактические ошибки при ответах на поставленные вопросы или вовсе не отвечает на них. Работа требует доработки. В этом случае смена темы не допускается.

Также при ведении курсовой работы необходимо учитывать психические и физические индивидуальные особенности каждого студента, в зависимости от них требуется детальный подход к выбору темы.

УДК 658

## МЕСТО СВОБОДНОГО И ОТКРЫТОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ИННОВАЦИОННОМ РАЗВИТИИ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Лукьяненко А.Ю.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Программное обеспечение является сегодня одним из наиболее важных и мощных инструментов, используемых в экономической деятельности. Оно используется практически везде и выполняет огромное количество задач. При этом программное обеспечение развивается и видоизменяется с огромной скоростью. Процесс этого

развития ограничен по большей части лишь затратами времени разработчиков, их изобретательностью и творческим подходом, а вот материальными факторами – гораздо меньше. Скорость этого развития лишь увеличивается, поскольку с помощью программного обеспечения создаются сами инструменты для его написания и отладки.

В Республике Беларусь ситуация с ролью программного обеспечения в экономике страны довольно неоднозначна. С одной стороны, белорусские программисты довольно высоко ценятся едва ли не во всем мире, с другой стороны – за редким исключением об их успехах простые граждане нередко ничего не знают и итогов работы не видят. В стране активно внедряются информационные технологии, но при этом большая часть разработок опирается или основана на зарубежных патентах и лицензиях. Уже со школы дети умеют использовать компьютерные программы в своей учебной деятельности, но при этом не умеют и не учатся их выбирать эти самые программы. В законодательстве страны имеются рычаги защиты интеллектуальной собственности и авторских прав, но при этом огромный процент пользователей в своей деятельности использует пиратское программное обеспечение и не видит этому никаких альтернатив. Политика экономического развития Республики Беларусь делает серьёзный упор в том числе и на импортозамещение, но при этом в сфере массово используемого программного обеспечения никаких значимых достижений на виду нет. Существует множество других проблем и противоречий, которые на первый взгляд кажутся нерешаемыми, однако решить их всё же можно.

Современный рынок программного обеспечения развивается очень быстро. Настолько быстро, что влиться в него, создавая что-то с нуля, и не быть задавленным конкурентами, практически невозможно. И даже в случае успеха обрести массовую популярность - задача не менее сложная. Это порождает ситуацию, когда потребители начинают искренне считать, что они весьма ограничены в наборе программных инструментов для своей деятельности, если хотят добиться наилучших результатов. О создании чего-либо своего не идет даже и речи, равно как и об улучшении имеющихся программ своими силами. Практически у каждого пользователя, вне зависимости от его реальных нужд, стоит всем известный набор программ известный каждому (Windows, Microsoft Office, WinRAR и другие), причем, половина, если не все, из этих программ взломаны. В конечном счете получается следующая ситуация:

- программы, как инструмент экономической деятельности, белорусскими пользователями фактически полноценно не выбираются;
- типовой набор программ стандартного пользователя, осуществляющего экономическую деятельность, чаще всего минимум на половину состоит из взломанных программ;
- в случае, если программы не взломаны, их суммарная стоимость может превосходить сумму в 700–1000 долларов США;
- лицензионные соглашения программного

обеспечения могут серьезно ограничивать пользователя и ставить его в зависимость от организации-производителя программы;

- в популярных коммерческих программных продуктах первой необходимости (работа с документами, архивами, графикой) нередко встроены неотключаемые и скрытые следящие и собирающие данные алгоритмы;

- своего массового программного обеспечения (например, офисного пакета) в Республике

Беларусь нет, и деньги за подобные продукты в огромном количестве уходят из экономики страны;

- создать с нуля серьезные программы, которые будут современными и популярными, с нуля практически невозможно – они устареют еще до того, как будут выпущены в свет их первые версии;

- привлечь инвесторов под инновационное развитие экономики страны за счет развития собственного программного обеспечения тоже не получится – практически все инвесторы уже давно вкладываются в Microsoft, Google, Apple и даже их более мелких конкурентов.

Всё это не только не способствует инновационному развитию экономики страны, особенно в сфере информационных технологий, но и вообще ставит Республику Беларусь в разряд донора денежных ресурсов, и потребителя, который пользуется тем, что дают. Пока белорусские программисты создают программную базу для современного лазера или системы наведения, чтобы заработать свой миллион долларов, вся страна в сумме отдает за границу в пять раз больше, нивелируя этот заработок, и всё чтобы иметь возможность набрать документ и отправить его по электронной почте. Решения сложившейся ситуации есть, однако одним из наиболее перспективных является упор на свободное и открытое программное обеспечение (СПО и ОПО) в сочетании с обучением белорусского пользователя объективно выбирать инструмент для своей экономической деятельности. Умение ориентироваться в программных продуктах дает возможность осуществить подбор программного обеспечения под нужды и требования вместо слепой установки программ, которые будут использоваться на 10-25%. Зато они будут оплачены или взломаны (со всеми вытекающими рисками). И если вопрос с обучением и донесением информации о возможности выбора программного обеспечения под свои нужды лежит скорее в социальной плоскости, то с СПО и ОПО есть место для инновационного подхода к экономическому развитию.

В случае с интеграцией свободного программного обеспечения в процесс экономического развития страны речь идет именно об интеграции, а не о разработке с нуля или покупке готовых решений из некоторого списка. Специфика свободной или открытой лицензии, а также доступность исходных наработок делает возможным влиться в уже существующий процесс развития того или иного программного продукта, причем, на равных. Экономика, активно работающая с отраслью свободных программ, может также извлекать пользу из децентрализованной системы разработки с большим числом волонтеров. При этом доходы в области свободных программ, пусть, и ниже, чем у сферы проприетарных программ, но отнюдь не мизерны. Также разработка свободных программ привлекает внимание не только со стороны отдельных инноваторов, но и гигантов индустрии – Microsoft, Google, Oracle, Mozilla. Эти компании готовы вкладывать огромные суммы денег ради новинок и идей, которые рождаются в отрасли свободных программ, готовы делиться знаниями, опытом и наработками. Свободные программы отнюдь не призваны лишить программистов стимулов к работе. Код рассматривается как знания, которые нельзя скрывать от пользователя. Для этого требуется совершенно другая бизнес-модель, с которой множество компаний уже успешно работают, однако более глобальный уровень, такой как экономика страны или её часть, мог бы полностью раскрыть потенциал возможности инновационного развития и взаимовыгодного сотрудничества с отраслью свободного программного обеспечения. Благодаря свободам лицензии программ и ресурсам, которые может предоставить государство, появляется возможность быстро и без непреодолимых ограничений в разнообразии реализуемых идей строить вектор инновационного развития экономики страны, используя полный потенциал такого инструмента, как программное обеспечение.

Немаловажную роль в развитии экономики играют также экономическая и информационная безопасность. Благодаря открытости и специфике лицензий свободного (для открытого тоже отчасти применимо) программного обеспечения, появляется фундамент, устойчивость к таким внешним факторам как влияние иностранных организаций, потенциальные санкции. Исчезают риски, связанные с нелегальным программным обеспечением и пиратством. Этот эф-

фект проявляется даже в случае, если сотрудничество со сферой свободного программного обеспечения ограничено лишь его использованием, поскольку ничто не мешает провести аудит исходного кода, определить наличие или отсутствие шпионящих или ограничивающих модулей в программе. Именно открытый исходный код позволяет быстрее находить уязвимости и ошибки в программе, а в случае свободной лицензии – потенциально быстрее исправлять их. Жизненный цикл программы со свободным или открытым исходным кодом не так сильно зависит чьих-либо прихотей и при желании и определенных усилиях может продолжаться практически вечно или завершиться переходом на другой продукт.

В целом создание собственных программ не с нуля вместе с опытными группами способно кардинально изменить роль свободного и открытого программного обеспечения в экономике Республики Беларусь, скорость его разработки и массовость его распространения. При этом возрастет также внимание и желание помогать и инвестировать в данную сферу у серьезных международных и небольших организаций и даже отдельных разработчиков. Повышается имидж страны. А в страну с высоким имиджем в информационной сфере начинают приходить инноваторы и инвесторы не только этого профиля, но и в совершенно других.

Таким образом можно сделать вывод, что программное обеспечение с открытым или свободным исходным кодом при правильном подходе способно стать тем инструментом, который может кардинально повлиять на инновационное развитие экономики страны и значительно повысить желание инвесторов вкладывать в нее деньги и усилия. Это может стать настоящим поворотом по сравнению с тем, куда направлено развитие сейчас, а также тем самым опытом, который будут изучать и перенимать у Республики Беларусь.

1. Бабурин В.А., Яненко М.Е. Маркетинг свободного программного обеспечения: новые технологии и инновационные решения. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/marketing-svobodnogo-programmnogo-obespecheniya-novye-tehnologii-i-innovatsionnye-marketingovyie-resheniya> - Дата доступа: 03.09.2017.
2. Материалы международного форума «Инновационные технологии и системы»: — Минск: ГУ «БелИСА», 2006. – 156 с.
3. Где инновации «бьют ключом»? [Электронный ресурс] / Интернет-журнал о бизнесе и карьере Режим доступа: <http://ponedelnikmag.com/post/gde-innovacii-byut-klyuchom>. – Дата доступа: 03.09.2017.

## ОЦЕНКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ляхевич А.Г.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Активная инновационная деятельность является базой обеспечения конкурентоспособности продукции приборостроительных предприятий Республики Беларусь. Для экспресс-оценки динамики инновационной активности и соответствующей корректировке управленческих решений может использоваться следующая методика, основанная на анализе данных отчета об инновационной деятельности организации:

1) для проведения анализа делается выборка предприятий, наиболее полно представляющих структуру отрасли. Использование выборки обусловлено необходимостью снижения трудоемкости расчетов, поскольку в расчетах используются не итоговые данные по отрасли, а данные по отдельным предприятиям (это требование обусловлено сутью самой процедуры);

2) по предприятиям выборки рассчитывается отношение объема отгруженной за год инновационной продукции к годовой сумме затрат на технологические инновации. Рассчитанное значение отражает стоимость пользующейся спросом конкурентоспособной инновационной продукции, созданной в расчете на один рубль затрат;

3) по предприятиям выборки также рассчитывается отношение объема отгруженной за год инновационной продукции к общему объему всей отгруженной за год продукции;

4) из всех предприятий выборки выделяются только те, у которых рассчитанное в пунктах 2 и 3 отношение либо ниже, чем в среднем по выборке, либо ниже некоторого минимально допустимого предела (данный предел может устанавливаться на уровне среднего значения 3 предшествующих лет или на основании нормативов, обоснование величины которых нуждается в дальнейшем исследовании);

5) для предприятий, отобранных в пункте 4, исследуется динамика изменений за предшествующие 3 года показателей, рассчитанных по пунктам 2 и 3, а также факторы, препятствующие инновациям. По результатам анализа выявляются инновационно-пассивные предприятия, к числу которых относятся те, для которых показатели по пунктам 2 и 3 в динамике по годам остаются на постоянном уровне (изменяется не значительно), либо имеют отрицательную динамику, а оценка факторов, препятствующих инновациям, не меняется по структуре или имеет общую

положительную динамику (сумма балльной оценки всех факторов уменьшается);

6) рассчитывается удельный вес числа инновационно-пассивных предприятий, среди предприятий выборки, а также удельный вес стоимости отгруженной продукции инновационно-пассивных предприятий в стоимости всей отгруженной продукции предприятий выборки;

7) рассчитывается показатель инновационной активности предприятий отрасли, как величина равная 1 – удельный вес инновационно-пассивных предприятий (в натуральном и стоимостном выражении).

Для повышения инновационной активности и совершенствования инновационной деятельности приборостроительных предприятий необходимо реализовать комплекс мер, приведенных ниже.

Для крупных предприятий приборостроительной отрасли характерна глубокая иерархическая структура, с множеством уровней управления и сложными механизмами принятия решения. Такая структура обусловлена объективными причинами, такими, например, как норма управляемости (построение плоской организационной структуры в таком случае затруднено, т.к. может привести к ухудшению управляемости). С другой стороны, многоуровневая иерархическая структура означает снижение скорости реагирования предприятия на изменения во внешней среде; «размывание ответственности» и склонность к передаче ответственности на вышестоящие уровни управления (которые, зачастую, разбираются в узкоспециальных вопросах значительно хуже непосредственных исполнителей); усиления влияния внутрикорпоративных конфликтов на принятие решений, что, в целом, затрудняет активное внедрение практически значимых инноваций. Выходом в данной ситуации могло бы стать активное использование венчурного финансирования, в частности использование венчурных фондов и портфельного инвестирования при реализации инновационных проектов. Такой подход позволит оценивать результаты инновационной деятельности того или иного менеджера не по итогам отдельного проекта, а по всей совокупности реализованных за определенный период проектов. Поскольку мировая практика инноваций свидетельствует, что лишь 10% инновационных проектов успешны [1, с.61], то оценка деятельности менеджера по результатам каждого

отдельного проекта фактически означает необходимость применения к менеджеру репрессивных мер в 90% случаев из ста. Также необходимо отметить, что для того чтобы 10% успешных проектов компенсировали неудачу по остальным 90% проектов – рентабельность этих проектов должна существенно превышать среднюю рентабельность по отрасли и рентабельность традиционных инвестиционных проектов. Установление каких-либо искусственных ограничений уровня рентабельности по инновационным проектам недопустимо и свидетельствует о непонимании самой сути стратегического инновационного развития.

Приборостроительные предприятия могли бы существенно повысить эффективность инновационной деятельности за счёт реализации соответствующих инновационных стратегий. В качестве примера можно привести стратегию предконкурентной консолидации, заключающуюся в объединении усилий по получению необходимых научных результатов, с последующей жесткой конкуренцией на этапе освоения инновации. Предконкурентная консолидация позволит повысить эффективность инновационной деятельности за счёт специализации и кооперации предприятий, диверсифицировать риск и ответственность за результаты исследований между участниками, снизить стартовые инвестиции в инновации приходящиеся на долю каждого участника. Все это будет способствовать снижению сопротивления инновациям со стороны менеджмента предприятий. С другой стороны, активная конкуренция на фазе внедрения новшества и наличие широкого круга участников, имеющих возможность воспользоваться результатами исследований, будет способствовать ускорению практической реализации результатов научных разработок и не позволит положить их «под сукно». Именно недостаточный уровень конкуренции является мощнейшим тормозом инновационной деятельности. Основная цель любой инновации – обеспечение конкурентных преимуществ. В случае недостаточной конкуренции инновационная деятельность теряет смысл. В этой связи необходимо стремиться к максимальной демонаполизации всех отраслей белорусской экономики. Также, с учётом наметившейся тенденции оптимизации затрат на научные исследования и разработки, приборостроительным предприятиям может быть рекомендовано приобретение лицензий, с последующим форсированным освоением и разработкой на базе этих лицензий собственной принципиально новой продукции с высокой прибылью и новым рынком. Использование лицензий, как базы собственных разработок, активно применяется в мировой практике. Так,

например, большинство современного программного обеспечения разрабатывается на уже готовых «фрэймвоках», что не мешает разработчикам создавать уникальные и хорошо продающиеся продукты. Более того, попытка написать программное обеспечение самостоятельно «с нуля» привело бы к неоправданному затягиванию цикла разработки и моральному устареванию продукта уже к моменту его выхода на рынок. Таким образом, использование лицензий как базы собственных разработок позволяет сократить продолжительность инновационного цикла и получить более быструю отдачу от вложенных средств, а также значительно снизить риск и неопределенность результатов исследований, избежать финансирования тупиковых и малоперспективных путей развития. В существующих условиях незначительного выделения средств на исследования и разработки, представляется мало реалистичной возможность доминирования на широком сегменте рынка. В этой связи целесообразна концентрация средств на улучшении именно тех характеристик продукции, которые будут удовлетворять специфические запросы узкого сегмента рынка, присутствие на котором конкурентов ограничено. Поскольку менеджеры государственных предприятий не имеют «права на ошибку» при расходовании бюджетных средств, проведение разработок в узком сегменте рынка и, как следствие, снижение стартовых затрат на инновации, также обеспечит снижение объема риска и сопутствующего ему противодействия инновациям со стороны лиц принимающих решение.

Не следует упускать из виду и такой важный фактор, как необходимость проработки мотивации всех участников инновационного процесса. Абсолютно недопустима ситуация, когда экономия средств, достигнутая за счёт внедрения инновационных решений, направляется не на стимулирование инноваторов, а изымается вышестоящими органами, как «избыточно выделенные» ресурсы, с последующим пересмотром нормативов. Безусловно, сметы на выполнение работ должны анализироваться на предмет завышения цен и расхода материалов, а работы контролироваться по объёму и качеству выполнения, но следует различать инноваторов и недобросовестных исполнителей. Последовательная политика «наказания за инновации» в будущем неизбежно приведёт к существенному перерасходу средств, в силу полного сворачивания инновационной активности, взамен на неукоснительное соблюдение устаревших приёмов и методов работы.

1. Мясникович М.В. Научные основы инновационной деятельности. – Минск: ИООО «Право и экономика», 2003.– 280 с.

УДК 621

## ЭУМК ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МАТЕМАТИКА» ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА

Кондратьева Н.А., Прихач Н.К.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Заочное обучение объединяет в себе черты самообучения и очной формы обучения (установочные и экзаменационные сессии). В заочном обучении, в отличие от дневного, основной формой обучения является самостоятельная работа учащихся. Для очной и заочной формы обучения программы и учебники, как правило, общие. Однако для заочников издаются методические указания к самостоятельной работе по учебным дисциплинам, дополнительный материал к учебникам, а также всё большее применение получают информационно-коммуникационные технологии обучения.

Современные реалии требуют более рациональных вариантов применения средств наглядности, позволяющих достичь большего образовательного эффекта. Использование технологических средств значительно упрощает процесс создания и передачи наглядных материалов от преподавателя к студенту. Одним из подобных наглядных пособий является электронный учебно-методический комплекс (далее – ЭУМК), который расположен в открытом доступе в Репозитории Белорусского национального технического университета, а следовательно предназначен для свободного распространения в учебных целях.

Особенностью ЭУМК является не только его доступность, но и компактность по сравнению с обычным учебным пособием. Возможность мгновенно открыть любую часть учебного материала также является достоинством электронного комплекса. Электронные материалы просты в использовании и имеют возможности для хранения и демонстрации на любом устройстве, удобном для студента.

Распространение и применение ЭУМК повышает качество обучения за счёт методически обоснованного систематического использования материалов пособия всеми участниками образовательного процесса на разных этапах учебной деятельности. Данные комплексы обеспечивают поддержку таких этапов учебной деятельности как объяснение учебного материала, его закрепление и повторение, организация самостоятельной деятельности студентов, промежуточный и итоговый контроль и самоконтроль.

ЭУМК по учебной дисциплине «Математика», изданный в 2016 году, создан коллективом преподавателей кафедры «Инженерная математика», предназначен для студентов

второго курса экономических специальностей заочного отделения приборостроительного факультета БНТУ и состоит из двух частей. Данный комплекс является продолжением опубликованного в БНТУ в 2011/2012 УМК «Высшая математика» для студентов-заочников первого курса экономических специальностей ПСФ за авторством доцента Попейко Н.С.

Первая часть УМК содержит материалы для тестирования и экзаменов по темам: «Элементы линейной и векторной алгебры», «Аналитическая геометрия», «Введение в анализ», «Дифференциальные исчисления функций одной переменной», «Функции нескольких переменных». Во вторую часть вошли материалы по темам: «Неопределенный интеграл», «Определенный интеграл и его приложения», «Ряды». Таким образом, при объединении изданных учебно-методических комплексов коллектива кафедры «Инженерная математика», создано учебно-методическое пособие по дисциплине «Математика» по разделам, которые предусмотрены учебной программой для студентов экономических специальностей.

Целью объединенного учебно-методического комплекса является предоставление справочных материалов для изучения дисциплины «Математика» студентами первого и второго курсов, как теории, так и алгоритмов решения задач, а также проверки полученных знаний при помощи контрольных работ и тестов.

ЭУМК имеет следующие особенности в структурировании и подаче учебного материала:

- 1) общие рекомендации по изучению дисциплины «Математика»;
- 2) вопросы к экзамену;
- 3) список рекомендуемой литературы;
- 4) теоретические сведения по следующим математическим разделам: дифференциальные уравнения и системы, теория вероятностей и математическая статистика (в первой части) и классификация задач линейного программирования, методы решения задач линейного программирования, симплекс-метод и двойственность в линейном программировании, модели транспортной задачи (во второй части);
- 5) типовые задания для контрольных работ;
- 6) пример решения типовой контрольной работы;
- 7) тест для самоконтроля при подготовке к экзамену.

ЭУМК объединяет в себе черты нескольких методов обучения: объяснительно-иллюстративный, репродуктивный и эвристический. Посредством объяснительно-иллюстративного метода (общие рекомендации, теоретические сведения) студенты получают знания из пособия в «готовом» виде. Восприимая и осмысливая факты, оценки, выводы, студенты остаются в рамках репродуктивного мышления. Данный метод находит самое широкое применение для передачи большого массива информации. Эвристический метод заключается в организации активного поиска решения выдвинутых в обучении (или самостоятельно сформулированных) познавательных задач на основе определённых указаний. К репродуктивному методу относят применение изученного на основе образца или правила (типовые задания для контрольных работ). Деятельность студентов носит алгоритмический характер, т.е. выполняется по инструкциям (пример решения типовой контрольной работы) в аналогичных, сходных с показанным образцом ситуациях.

Основной формой обучения на заочном отделении является самостоятельная работа студента над учебным материалом, которая заключается в изучении теоретических сведений по учебникам и учебным пособиям, а также поиск ответов на вопросы для самопроверки и выполнение контрольных и расчетно-графических работ. При разборе теоретического материала студенту заочного отделения следует переходить к новому вопросу только после полного освоения предыдущего с выполнением всех вычислений и с построением всех необходимых графиков и чертежей. Особое внимание необходимо уделять изучению основных понятий и определений курса. Во время прохождения курса студент должен выполнить ряд контрольных работ с целью закрепления материала и проверки его усвоения. На практических занятиях преподавателю необходимо провести проверку уровня владения материалом с помощью учебного теста. Эти этапы являются основанием для допуска обучающегося к экзамену.

ЭУМК может использоваться студентами при самостоятельной подготовке по разделам математики, которые предусмотрены учебной программой для экономических специальностей изучения дисциплины. В первой части ЭУМК, изданного в 2014 году, содержатся материалы для подготовки к экзамену и тестированию по темам: «Дифференциальные уравнения и системы

дифференциальных уравнений», «Теория вероятностей и математическая статистика». Вторая часть ЭУМК для второкурсников издана в 2016 г. и включает учебный материал по разделам курса, в которых рассматриваются элементы математического программирования: «Классификация задач линейного программирования», «Графический метод решения задачи линейного программирования», «Симплекс-метод. Двойственность в линейном программировании», «Закрытая и открытая модели транспортной задачи». Учебный материал проиллюстрирован примерами, таблицами и графиками и доступен для самостоятельного изучения. Предложенный вариант контрольных работ составлен для проверки знаний студентов по теоретическому курсу третьего и четвертого семестров изучения дисциплины «Математика» для экономических специальностей дневной и заочной форм обучения и предоставляет преподавателю возможность широкого выбора при подготовке проверочных заданий для студентов.

ЭУМК предназначен для преподавателей и студентов при изучении дисциплины «Математика». ЭУМК способствует усвоению теории и формированию у студентов устойчивого интереса к математике и к применению ее на практике. Современная экономическая теория и практика требует применения адекватных математических методов и моделей, использование которых позволяет получить количественные оценки различных экономических показателей и верно принимать обоснованные экономические решения.

Использование ЭУМК как одного из средств обучения позволяет оптимально сочетать теоретические и практические аспекты при изучении дисциплины «Математика». Внедрение ЭУМК предоставляет определённые возможности: основные этапы обучения сохраняются, но значительно расширяется и упрощается сектор самостоятельной учебной работы как неотъемлемой части учебного процесса.

ЭУМК является одним из способов оптимизации заочного обучения дисциплине «Математика» для экономических специальностей высшего учебного заведения и позволяет развить системный стиль мышления. ЭУМК позволяет рассмотреть предмет как целостную систему, выявить наиболее значимые и устойчивые связи в этой системе и позволяет легко выявлять существующие закономерности.

## ОБЩАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ БЕЛАРУСИ

Серченя Т.И., Ладутько М.М.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Одним из спорных вопросов, возникающих при обсуждении конкурентоспособности стран, является вопрос определяющих ее факторов и степени их важности. Для того чтобы определить, в какой степени отдельные факторы влияют на рейтинг конкурентоспособности, используем построения линейного уравнения регрессии и расчета его характеристик с помощью с пакета «Анализ данных» Microsoft Excel.

Для расчетов степени зависимости конкурентоспособности от других факторов использована выборка из тридцати стран в рейтинге глобальной конкурентоспособности.

В качестве показателей, определяющих конкурентоспособность стран, были выделены следующие: индекс инноваций, индекс экономики знаний, рейтинг стран мира по уровню экономической свободы, индекс эффективности логистики, уровень налоговой нагрузки в исследуемых странах.

Глобальный индекс инноваций – это глобальное исследование и сопровождающий его рейтинг стран мира по показателю уровня развития инноваций. Индекс представляет собой соотношение располагаемых ресурсов и условий для проведения инноваций и достигнутых практических результатов, что позволяет объективно оценить эффективность усилий по развитию инноваций в той или иной стране.

Результаты построения линейного уравнения регрессии между глобальным индексом конкурентоспособности (y) и глобальным индексом инноваций (x) отобразим в виде формулы

$$y = 0,05x + 2,72. \quad (1)$$

Из уравнения регрессии следует, что возрастание индекса инноваций на 1 ед. приводит к увеличению индекса конкурентоспособности в среднем на 0,05 ед. Величина коэффициента детерминации ( $R^2_{yx} = 0,83$ ) показывает, что вариация глобального индекса конкурентоспособности на 83 % объясняется вариацией глобального индекса инноваций. Для приемлемых моделей предполагается, что коэффициент детерминации должен быть хотя бы не меньше 50 %. Модели с коэффициентом детерминации выше 80 % можно признать достаточно хорошими.

Поскольку фактическое значение F-критерия Фишера ( $F_{\text{факт}}=139,12$ ) больше табличного ( $F_{\text{табл}}=4,20$  с учетом заданного уровня значимости  $p=0,05$ ), то коэффициент детерминации

статистически значим. Полученные данные свидетельствует о том, что фактор развития инновации в значительной степени определяет положение стран в рейтинге конкурентоспособности. В рейтинге глобального индекса инноваций Республика Беларусь занимает 79 место (Показатель 30,39).

Следующий рассматриваемый показатель – индекс экономики знаний. Индекс экономики знаний – это комплексный показатель, характеризующий уровень развития экономики, основанной на знаниях, в странах и регионах мира. В основе расчёта Индекса лежит предложенная Всемирным банком «Методология оценки знаний», которая включает комплекс из 109 структурных и качественных показателей, объединённых в четыре основные группы: 1) Индекс экономического и институционального режима; 2) Индекс образования; 3) Индекс инноваций 4) Индекс информационных и коммуникационных технологий.

Результаты построения линейного уравнения регрессии между глобальным индексом конкурентоспособности (y) и глобальным индексом экономики знаний (x) отобразим в виде формулы

$$y = 0,21x + 3,42. \quad (2)$$

Из уравнения регрессии следует, что возрастание индекса экономики знаний на 1 ед. приводит к увеличению индекса конкурентоспособности в среднем на 0,21 ед.

Величина коэффициента детерминации ( $R^2_{yx} = 0,55$ ) показывает, что вариация глобального индекса конкурентоспособности на 55 % объясняется вариацией индекса экономики знаний. Данная модель уравнения регрессии является допустимой. Поскольку фактическое значение F-критерия Фишера ( $F_{\text{факт}}=33,09$ ) больше табличного ( $F_{\text{табл}}=4,20$  с учетом заданного уровня значимости  $p=0,05$ ), то коэффициент детерминации статистически значим и положение стран в рейтинге глобальной конкурентоспособности в средней степени определяется индексом экономики знаний. В данном рейтинге Республика занимает 59 место с показателем 5,59.

Индекс экономической свободы – это комбинированный показатель и сопровождающий его рейтинг, оценивающий уровень экономической свободы в странах мира.

Эксперты определяют экономическую свободу как «отсутствие правительственного

вмешательства или воспрепятствования производству, распределению и потреблению товаров и услуг, за исключением необходимой гражданам защиты и поддержки свободы как таковой». Результаты построения линейного уравнения регрессии между глобальным индексом конкурентоспособности ( $y$ ) и индексом экономической свободы ( $x$ ) отобразим в виде формулы

$$y = 0,05x + 1,25. \quad (3)$$

Из уравнения регрессии следует, что возрастание индекса экономики знаний на 1 ед. приводит к увеличению индекса конкурентоспособности в среднем на 0,05 ед. Величина коэффициента детерминации ( $R^2_{yx} = 0,56$ ) показывает, что вариация глобального индекса конкурентоспособности на 55 % объясняется вариацией индекса экономической свободы. Данная модель уравнения регрессии является допустимой. Поскольку фактическое значение F-критерия Фишера ( $F_{\text{факт}} = 35,62$ ) больше табличного ( $F_{\text{табл}} = 4,20$  с учетом заданного уровня значимости  $p = 0,05$ ), то коэффициент детерминации статистически значим.

Отсюда следует, что такой фактор, как индекс экономической свободы в большей степени определяет положение стран в рейтинге глобальной конкурентоспособности. Индекс экономической свободы для Республики Беларусь составляет 58,60 (104 место).

Индекс эффективности логистики (LPI – Logistics Performance Index) рассчитывается на основе опросов международных, национальных или региональных логистических и складских операторов транспортно-экспедиторских компаний. Результаты построения линейного уравнения регрессии между глобальным индексом конкурентоспособности ( $y$ ) и индексом эффективности логистики ( $x$ ) отобразим в виде формулы

$$y = 0,90x + 1,73. \quad (4)$$

Из уравнения регрессии следует, что возрастание индекса экономики знаний на 1 ед. приводит к увеличению индекса конкурентоспособности в среднем на 0,90 ед.

Величина коэффициента детерминации ( $R^2_{yx} = 0,70$ ) показывает, что вариация глобального индекса конкурентоспособности на 70 % объясняется вариацией индекса экономической свободы. Поскольку фактическое значение F-критерия Фишера ( $F_{\text{факт}} = 65,92$ ) больше табличного ( $F_{\text{табл}} = 4,20$  с учетом заданного уровня значимости  $p = 0,05$ ), то коэффициент детерминации статистически значим.

Следовательно, такой фактор как индекс эффективности логистики в значительной мере влияет на показатель конкурентоспособности страны и определяет ее. Что касается Республики Беларусь, в рейтинге эффективности логистики, она занимает 120 место (Показатель = 2,40).

Аналогично предыдущим примерам проведем регрессионный анализ рейтинга конкурентоспособности и налоговой нагрузки. Рейтинг оценивает налоговую нагрузку среднестатистического предприятия в разрезе администрирования и уплаты корпоративного налога, социальных отчислений, налогов, взимаемых с доходов работников, налогов на имущество, налогов на передачу права собственности, налогов с дивидендов и других обязательных платежей, которые должен платить бизнес.

Результаты построения линейного уравнения регрессии между глобальным индексом конкурентоспособности ( $y$ ) и уровнем налоговой нагрузки ( $x$ ) отобразим в виде формулы

$$y = -0,0012x + 4,94. \quad (5)$$

Из уравнения регрессии следует, что возрастание индекса налоговой нагрузки практически не приведет к изменению индекса конкурентоспособности. Очень низкая величина коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,0005$ ) показывает, что вариация глобального индекса конкурентоспособности в большей степени объясняется вариацией случайных факторов. По уровню налоговой нагрузки Республика Беларусь занимает 99 место среди стран мира (Показатель 54,80).

Таким образом, настоящий двигатель конкурентоспособности страны – это инновации, наука и технологии, экономическая свобода, логистика и образование. При этом самый большой коэффициент детерминации наблюдается у индекса инноваций.

На основании уравнений регрессии и показателей Республики Беларусь в данных индексах можем говорить, что показатель глобального индекса конкурентоспособности для нашей страны составляет 4,00 (место 83-91).

Что касается уровня инновационного развития, то он остается крайне низким. В числе важнейшей проблемы функционирования национальной инновационной системы следует выделить критически низкий уровень наукоемкости ВВП.

Недостаток собственных средств, высокие риск и стоимость инноваций выступают как основные факторы снижения инновационной активности. Для активизации инновационной деятельности необходимо проведение следующих мероприятий 1) развитие инновационного предпринимательства; 2) повышение эффективности коммерциализации результатов научно-технической деятельности и формирование рынка научно-технической продукции; 3) развитие инновационной инфраструктуры; 4) развитие международного научно-технического и инновационного сотрудничества.

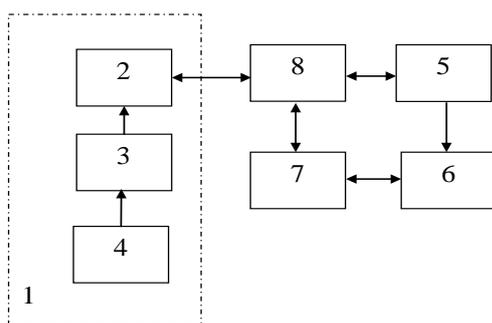
Все эти меры в комплексе будут способствовать, в том числе, и повышению уровня национальной конкурентоспособности.

УДК 621.717

**ОБОБЩЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ****Филиппова М.В., Волошин К.П., Сегол Р.И.***Национальный технический университет Украины**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина*

Усовершенствование процессов управления организаций производства является первоочередным заданием современного производства в условиях непрерывной конкурентной борьбы, усложнения производственно-технических и организационно-экономических систем, а также влияние Интернет технологий на управление как производством, так и технологическими процессами. Решение данной задачи требует комплексного подхода, с использованием как визуальных средств представления процессов организации производственной системы, так и статических методов контроля качеством изделий, технологической подготовки производства и производства в целом [1].

Предложенная обобщенная система управления производством (рис. 1), содержит как блоки управления системой в целом, так и блоки контроля за показателями качества. Данная система содержит блок управления производственной системой (1), в который входит блок оператора (3), вход которого подключен к выходу блока информации о производственных заданиях (4), а выход к входу блока управления технологической подготовкой производства (2), который имеет связь с блоком "обобщенная производственная система" (5), и содержит последовательно соединенные через связь вход – выход блок "обобщенная производственная система" (5), блок контроля производственной системы (8), блок контроля готовых изделий (7) и блок готовых изделий (6).



1 – блок управления системой, 2 – блок управления технологической подготовкой производства, 3 – блок оператора, 4 – блок информации про производственные задания, 5 – блок «обобщенная производственная система», 6 – блок готовых изделий, 7 – блок контроля готовых изделий, 8 – блок контроля производственной системы

Рисунок 1 – Обобщенная система управления приборостроительным производством

В обобщенной системе управления производством, все управление осуществляется на основе диалога оператора и блока управления

технологической подготовкой производства, где формируется или выбирается оптимальный технологический процесс, имеющий связь с производственной системой и блоком ее контроля. На рисунке 2 показан блок управления технологической подготовкой производства, который состоит из блока 9 принятия решения о внедрении технологического процесса в производство, блока формирования решения про проведение технологической подготовки производства 10, блока анализа необходимости отображения отдельных подпроцессов 11, блока показателей качества технологической подготовки производства и ее составляющих 12, блока сбора данных о показателях качества их предварительной обработки 13, блока выявления ключевых показателей качества и управления технологической подготовкой производства при изменении их значений 14, блока регулярного мониторинга показателей качества 15 как технологической подготовкой производства, так и производства в целом [1,2].

При этом в блоке 9 для управления технологической подготовкой производства формируется межфункциональная команда для проведения последующих работ в соответствии с результатами анализа управления. Выбор необходимой команды на управление как технологической подготовкой производства, так и производства в целом осуществляется на основе анализа мониторинга существующей подготовки производства и технологических процессов изготовления и анализа результатов работы предприятия.

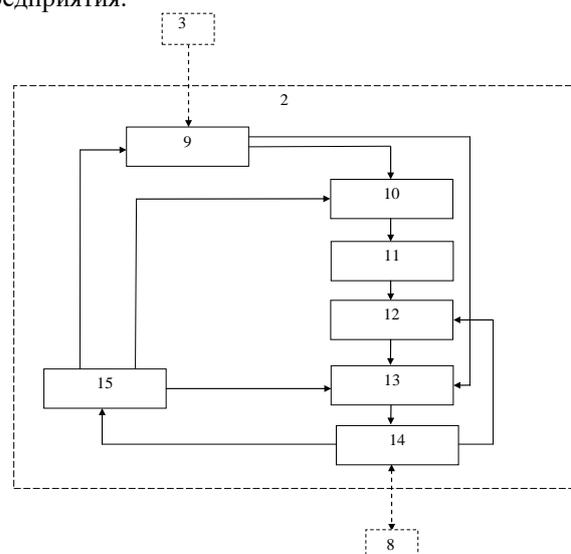


Рисунок 2 – Блок управления технологической подготовкой производства

Для формирования решения про проведение технологической подготовки производства (блок 10) необходимо опираться на принципы управления технологическими процессами. После чего следует провести анализ адекватности полученной модели сложного технологического процесса, с целью выявления недостающих входов, выходов, подпроцессов и взаимосвязей между ними. Анализ необходимости отображения отдельных подпроцессов (блок 11) проводится с целью оптимизации трудоемкости работ и исключения подпроцессов, которые не приносят прибавленную стоимость готовому изделию.

Управление выходами и входами как технологической подготовки производства, так и производственной системы в целом проводится с помощью изменения значений ключевых показателей качества [3].

Мониторинг показателей качества производственной системы (блок 15) проводится с целью: наблюдения за ходом реализации технологической подготовки производства и соответствующих подпроцессов; оценки результативности действий; определение момента обнаружения ключевых показателей качества, которые не оказывают значительное влияние в показатели качества выходов производственного процесса для определения новых ключевых показателей качества [4].

Система загрузки обобщенных производственных систем сборки на основе статистического управления сложными технологическими процессами работает следующим образом. Оператор 3, получает производственное задание от блока информации о производственных заданиях 4, и через блок управления технологической подготовкой производства 2 задает параметры производства, которые попадают в блок 9 принятия решения о внедрении, выбора технологического процесса (ТП), и создания межфункциональной команды. Блок 9 имеет выход на блок 10 проведения декомпозиции сложного технологического процесса и блок сбора данных о показателях качества сложного технологического процесса и выходов его

подпроцессов 13. При этом выясняется исследовался ли процесс раньше и в нем не возникли ли изменения в технологии. Блок 15 регулярного мониторинга показателей качества имеет вход из блока 14 выявления ключевых показателей качества и их через изменение их значений и выход к блоку, к блоку 10 и к блоку 13 который имеет выход на блок 14 выявления ключевых показателей качества и управления технологической подготовкой производства при изменении их значений. В нем учитывается коэффициент уровня влияния, которое имеет вход-выход с блоком 8 контроля производственной системы и выход на блок 12 определения показателей качества и составляющих его подпроцессов. Выбранный ТП передается через блок контроля 8 в блок обобщенной производственной системы 5, которая реализует его при изготовлении, в блок готовых изделий 6 с последующим их контролем в блоке 7. Затем осуществляется итерационный процесс анализа правил выбора конструктивных решений.

Применение такой системы позволяет уменьшить время выбора оптимального технологического процесса, сократить сроки, как подготовки производства, так и производства новых изделий, повысить эффективность использования производственных систем и улучшить качество готовых изделий.

1. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Филиппова М.В., Диордица И.Н. Система загрузки обобщенных производственных систем сборки на основе статистического управления сложными технологическими процессами // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – №. 1. – С. 41-45.
2. Filippova M.V., Demchenko M.O., Matvienko S.M. Modelling of technological process of assemblage by means of IDEFO //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – Т. 2. – №. 3 (62). – С. 44-47.
3. Пашков П. И. Разработка методики статистического управления технологическими процессами на основе исследования взаимодействия показателей качества: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва: МАТИ, 2008. – 22с.
4. Рузина, Е. А. Реализация ИПИ-технологий в разработке автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления инструментальным производством // Информ. технологии в проектировании и производстве. – 2007. – № 4. – С. 94-100.

УДК 330.342.3

## ЗОНА РАЗВИТИЯ НОВОЙ И ВЫСОКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В НАНКИНЕ

Ци Ци, Алексеев Ю.Г.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

ЗРНВТ в Нанкине основана совместно с Правительством провинции Цзянсу и местным правительством Нанкин в 1988 году. Она ратифицирована на государственном уровне ЗРНВТ в 1991 году. Зона создана в дельте реки Янцзы ранее, имеет эффективный механизм управления в органах зоны, инфраструктура более

совершенным, широкое экономическое сотрудничество, функциональная интеграция, значительно коммерциализации и промышленного освоения научно-технических достижений.

Зона занимает свое преимущество в разработке трех ведущих отраслей промышленности:

- программное обеспечение (IT) и электронная информация;
- биологическая медицина;
- промышленность спутниковой навигации.

В 2015 г. объем доходов промышленного производства и торговли в зоне составили 247,7 млрд. юаней (около 35,9 млрд. долл. США); валовой региональный продукт составил 298 млрд. юаней (около 4,3 млрд. долл. США); доходы местного бюджета от его деятельности составили 4,945 млрд. юаней (около 0,72 млрд. долл. США). В зоне имеет 120 предприятий хай-тек, доля инвестиций в НИОКР к ВВП составила 5,3% [1]. В 2015 году ЗРНВТ Нанкина заняла десятое место в ЗРНВТ на государственном уровне [2].

Согласно соответствующим политикам строительства ЗРНВТ с Комитетом науки и техники КНР и опыт "одна зона с несколькими парками" из других провинций и городов, и в свете фактического положения ЗРНВТ в Нанкине, в январе 1997 года, Нанкинского муниципального правительства принято решение внести необходимые коррективы в исходный высокотехнологичные зоны регионального планирования: в планировании площадью 16,5 квадратных километров одобрен государственным Советом, ЗРНВТ в Нанкине доводила до "одна зона с несколькими парками". Скорректированный Нанкин Hi Tech промышленной зоны развития с Нанкин высокотехнологичной промышленной зоны развития в качестве основного органа, состояла из Южно-высокотехнологичная Промышленная зона развития (6,5 км<sup>2</sup>), Нанкин Ксинганг высокотехнологичный Промышленный Парк (5 км<sup>2</sup>), Цзяннин высокотехнологичный Промышленный Парк (5 квадратных километров) [3].

Через 29 лет развития Зоны, Зона имеет площадь 160 квадратных километров, и в нем более чем 2375 зарегистрированных компаний, более 500 предприятиям с иностранными инвестициями, 12 котируемых компаний и 48 торговых предприятий, чей годовой доход составляет более 100 млн. юаней. Зоны является одним из важнейших полюсов экономического роста в Нанкине и перечисленных представителей расширенный на государственном уровне ЗРНВТ в Китае.

Строительство "одной зоны с несколькими парками" может достичь мульти-точки взаимодействия, дополнительные преимущества, и определить функциональную направленность и промышленного разделения труда.

Может сделать более эффективным использование исходной базы развития и накопленной экономической мощи развития зона Цзяннин и Синьган, способствовать дальнейшему развитию

высокотехнологичных весь город промышленности, а также содействовать строительству района Цзяннин и Ксинганг.

**Каждый парк был образован отличительное преимущество.**

Высокотехнологичные зоны пукоу: зона Пукоу хай-тек является одним из первых на государственном уровне высокотехнологичных зон, утвержденных государственным Советом, разработанных ранее и имеет определенный опыт. Преимущество опираясь на мощь Нанкин большие университеты, институты и предприятия, и прочностные характеристики установка инкубации, опытно-промышленного производства и индустриализации, как один, и делает его стать демонстрационные базы Нанкин высокотехнологичных исследований, разработок и индустриализации.

Преимущества Парка высоких технологий Цзяннин: преимущества Парка Цзяннин аэропорт выдающиеся, основа развития очень хорошо, а комбинация район и парк может реализовать суперпозицию преимущества. Развитие частного предпринимательства открывает новые идеи и механизмы развития высокотехнологичных зон [4].

**Функции позиционирования на размещении промышленности ЗРНВТ.**

Функции позиционирования на размещении промышленности ЗРНВТ в Нанкине, функция должна быть определена как: на государственном уровне высокотехнологичной базы развития отрасли и экспортной базы высокотехнологичной продукции, научно-технических исследований и разработок центра и производственной базе электронных информационных и био медицины в районе Нанкина.

**Региональная функция ЗРНВТ в Нанкине.**

Региональная функция ЗРНВТ в Нанкине: инновационный центр в Северном крыле Дельты реки Янцзы, важным полюсом роста Нанкин столичной области и Центральном районе Цзянбэй новый городской район.

От ориентации функция ЗРНВТ в Нанкине, видно, что в качестве специального города, для того, чтобы избежать слепого развития. Высокотехнологичные зоны, должен иметь четкую ориентацию; однако, ориентация функция представляет собой очень сложную систему инженерных. Это связано с множеством факторов, нужно точно совместить и понять региональные, а также собственных разработок характеристикам научно-рациональной функции ориентацией из региона, отрасли, социальной и других сторон, и принять соответствующие меры для содействия здоровому и упорядоченному развитию разных региональной экономики КНР.

1. Website Nanjing New&High Technology industry development zone // Вебсайт ЗРНВТ в Нанкине.

- Электронный ресурс: [http://www.njnhz.gov.cn/art/2016/04/23/208\\_19912.html](http://www.njnhz.gov.cn/art/2016/04/23/208_19912.html).
2. Чэн Линхуа, Ли Тин, Гу Сяолэй, Чжан Инь, Цзин Вэйминг, Гао Цзянь. Отчет комплексного развития и анализ данных ЗРНВТ на государственном уровне в 2015 г. // ЗРНВТ в Китае. – 2016- № 11. – С. 18-27.
  3. Исследовательская группа. Планирование развития одной зоны с несколькими парками ЗРНВТ в Нанкине. // Технология и экономика. – 1998. – № 6. – С. 11-16.
  4. Дэн Синхуа. Разработка для создания особенности низкоуглеродной промышленности ЗРНВТ а Накине // Наука об окружающей среде и менеджмента – 2011- № 12. – С. 169-172.

УДК 338.9

## УЧАСТИЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В ФОРМИРОВАНИИ КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ, УЧАСТВУЮЩИХ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «ШЕЛКОВЫЙ ПУТЬ»

Мелюшин П.В.<sup>1</sup>, Афанасенко А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
<sup>2</sup>Минский государственный лингвистический университет  
Минск, Республика Беларусь

Текущий год ознаменовался началом нового этапа практической реализации широкомасштабного экономического проекта Китая по интеграции в мировую экономику под новым лозунгом «Один пояс – один путь». Уже началось движение грузового транспорта из Китая в Европу [1], в странах-транзитерах осуществляется создание инфраструктуры в различных сферах: логистике, дорожном строительстве, информационно-правовом обеспечении и других. Все это уже потребовало большого количества специалистов широкого спектра специальностей с обязательным знанием китайского и английского языков и языка той страны, где реализуются проекты «Шелкового пути» [2].

В предыдущие годы наметилась, а в нынешнем четко обозначилась новая тенденция в международной подготовке кадров – практически все китайские университеты и институты начали подготовку специалистов для обеспечения потребностей, связанных с реализацией проекта «Шелкового пути» не только в Китае, но и в странах-партнерах.

Подготовка иностранных граждан осуществлялась в Китае достаточно давно, но только в последние годы приобрела достаточно значимые масштабы и разнообразные формы. В этой работе принимают участие не только государственные, но и коммерческие высшие учебные заведения, предусмотрены различные уровни финансовой поддержки и формы обучения: базовой образование, магистратура, докторантура, повышение квалификации, освоение смежных специальностей и изучение китайского языка.

Учитывая маршрут и логистику движения товаров, состав специалистов, которые требуются для обслуживания товарно-материальных, финансовых, документальных и информационных потоков, в Китае реализуется широкомасштабная программа привлечения граждан именно тех стран, по территории которых будет проходить «Шелковый путь» для обучения их в национальных высших учебных заведениях. Только на текущий год предусмотрено целевое выделение

дополнительно 3000 стипендий различного вида именно для граждан этих стран.

Выделение стипендий осуществляется как центральным правительством, так и самими университетами и институтами. Максимальный размер стипендии составляет 3500 юаней в месяц, что вполне достаточно для оплаты не только собственно самого обучения, но и проживания в общежитии и других сопутствующих расходов.

Процесс и перечень документов, необходимых для получения стипендии может различаться в разных университетах и институтах, поэтому соискателям необходимо внимательно ознакомиться с требованиями, которые уже размещены на соответствующих сайтах на английском языке. При возникновении вопросов можно там же оперативно получить необходимые пояснения и комментарии.

При выборе высшего учебного заведения необходимо учитывать следующие важные моменты: срок обучения (четыре года для базового образования – аналог первой ступени высшего образования в Республике Беларусь, или бакалавриата, и два года для магистратуры) необходимо увеличивать на один год для углубленного изучения китайского языка (аналог подготовительно курса обучения в Республике Беларусь); наличия в нем факультетов и кафедр по подготовке специалистов по соответствующим специальностям; актуальный рейтинг высшего учебного заведения как по национальной, так и по международной методике.

Выбор специальности определяется также определяется как внешними факторами, так и индивидуальными предпочтениями потенциальных соискателей. Внешние факторы обусловлены спецификой финансово-экономической и организационно-логистической составляющих как самого китайского проекта, так и особенностями участия в его реализации стран-партнеров. Все это определяет и различие в формировании приоритетов Китая и других стран в отношении требуемых количества и профессионального состава специалистов, в

подготовке которых они заинтересованы. Именно поэтому для Китая интересна подготовка в первую очередь различных категорий переводчиков (технических, бизнес-переводчиков и др.) со знанием английского и китайского языков. Страны-партнеры, естественно, больше заинтересованы в подготовке специалистов по наиболее востребованным организациям и структурами проекта «Шелковый путь» специальностями в области международных финансов, маркетинга, логистики, права, страхования и других в сочетании со знанием китайского языка.

Индивидуальные предпочтения потенциальных соискателей не должны быть произвольными. Кроме, по возможности, объективной оценки собственных возможностей, необходимо принципиально определиться с выбором желаемых перспектив работы, которые можно оценивать в двух аспектах: выбор желаемой страны и выбор желаемой сферы деятельности организации, в которых соискатель намерен работать. Оценка собственных возможностей может быть основана на результатах обучения на предыдущих ступенях образования, результатах тестирования (как добровольного, так и обязательного – в отношении знания китайского языка), наличии сертификатов о прохождении соответствующих курсов и тренингов. Выбор страны и сферы деятельности также не должен быть формальным, так как при поступлении в китайские высшие учебные заведения и выделении различных стипендий соискатели обязаны объяснить мотивы своего выбора.

1. В зоне особого внимания потенциальных студентов и магистрантов китайских высших учебных заведений должны находиться как текущие, так и перспективные характеристики и стратегические возможности обучения в Китае. Затраты на обучение и другие сопутствующие расходы, даже без учета стипендии, ниже, чем в других странах, предлагающих бизнес- и различные формы и ступени образования, равно как и уровень потребительских цен; вероятность поступления и получения стипендии, которые уже достаточно высоки, растут из года в год. Перспективы и стратегические возможности при получении образования в Китае обусловлены не только их связью с проектом «Шелковый путь» и степенью участия Республики Беларусь в нем, а и ориентацией образования и профессиональной деятельности на Китай – нового лидера глобальной экономики. Важную роль при этом играют статус Республики Беларусь в качестве стратегического партнера Китайской Народной Республики и статус нашей республики в структуре Союзного государства с Российской

Федерацией, у которой также формируются особые политические и экономические отношения с КНР.

Примером таких отношений в области образования является соглашение между Россией и Китаем о создании совместного университета, в котором будут обучаться порядка 50 тысяч студентов.

Участие Республики Беларусь в проекте «Шелковый путь» уже приносит республике не только экономические, но и геополитические выгоды, создает новые возможности в различных сферах, в том числе и в области образования. Пока количество специалистов, которые получили образование в Китае, оценивается в несколько десятков. Значительно больше специалистов прошли стажировку в китайских высших учебных заведениях, прошли обучение в магистратуре. Практически все они имеют лингвистическое образование и профессионально востребованы. С другой стороны, участие китайских компаний и организаций в работе промышленного парка

«Великий камень» и реализации других белорусско-китайских проектов и соглашений, обусловило интерес китайских специалистов к получению образования в учреждениях высшего образования Республики Беларусь.

Во многих университетах республики традиционно обучается несколько сотен китайских студентов. В последние годы отмечается рост их количества, а также постоянное увеличение числа магистрантов, которые обучаются как по лингвистическим, так и другим специальностям. Многие выпускники продолжают работу в республике по полученным специальностям, а те, кто вернулся в Китай, также профессионально востребованы.

В современных условиях международный образовательный процесс не имеет форму обмена, а во многом обусловлен конкурентными преимуществами национальной системы образования. В этом отношении предложения китайских университетов и институтов в сочетании с возможностями всей системы образования и перспективами профессиональной деятельности в различных сферах интернациональной экономики Китая является существенным дополнением к глобальному проекту «Шелковый путь», по которому знания будут передаваться из Китая в Беларусь и далее в Европу и обратно.

1. Стредвик, Дж. Управление персоналом в малом бизнесе / Дж. Стредвик; пер. с англ. под ред. В.А. Спивака. – СПб.: Издательский дом «Нева», 2003. – 288 с.
2. Уткин, Э.А. Управление персоналом в малом и среднем бизнесе / Э.А. Уткин. – М.: АКАЛИС, 2006. – 156 с.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТРУДОВЫМ КОЛЛЕКТИВОМ

Акунец В.П., Зысь Т.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Важнейшим направлением совершенствования организации и функционирования трудового коллектива является обеспечение благоприятного морально-психологического климата коллектива. Для реализации этой задачи требуется качественная, объективная оценка условий производственной деятельности предприятий малого и среднего бизнеса.

Совершенствование управления предприятием обеспечивает благоприятные условия работы трудового коллектива. В связи с этим у людей возникает необходимость создать в трудовом коллективе благоприятный морально-психологический климат. Решение этой проблемы невозможно без соответствующего анализа условий организации и функционирования трудового коллектива.

Управление людьми в условиях формирования рыночных отношений и создания предприятий малого бизнеса сводится к следующему:

- определение роли каждого члена коллектива, его прав и обязанностей, уровня подготовки и квалификации;
- закрепление всеми возможными средствами социального статуса работника, занимаемого им и признаваемого всеми или почти всеми членами данного коллектива;
- создание условий, при которых работники смогли бы успешно реализовать свои профессиональные и социальные потребности.

Коллектив – это устойчивое объединение людей, для которого характерны следующие признаки: общность целей и задач деятельности; совместный труд; единство государственных, общественных и личных интересов; сотрудничество и взаимопомощь; сознательная дисциплина; наличие организующего начала.

Для нормального функционирования коллектива необходим благоприятный психологический климат.

Психологический климат – характер взаимоотношений между людьми, это преобладающие в коллективе взаимоотношения. Психологический климат зависит от совместимости работников. Выделяют два вида психологической совместимости:

1. Психологическая совместимость – это сходство в направленности психофизиологических реакций.
2. Социально-психологическая совместимость – следствие оптимального сочетания типов поведения людей, основывается на интересах, потребностях, ценностях, ориентациях.

Благоприятный психологический климат создают следующие факторы: непринужденная атмосфера общения; активное и совместное обсуждение вопросов; правильно понятная цель трудовой деятельности; уважительное отношение друг к другу; принятие решений в рабочем порядке; критические замечания без явных и личных выпадов; демократизм в общении; четкое распределение обязанностей и отсутствие мелочной опеки со стороны руководителя; высокое личное влияние и авторитет руководителя.

Авторитет – это признание коллективом форм, методов и результатов деятельности руководителя, при соответствии его субъективных черт объективным требованиям, предъявляемым к руководящей должности. Различают служебный и личный авторитет. Служебный авторитет является необходимым элементом руководящей должности, а личный завоевывается упорным трудом и другими личными качествами.

Трудовой коллектив в своем развитии проходит три этапа:

Первый этап: создание коллектива – для него характерны централизация управления, регламентация и контроль.

Второй этап: становление коллектива – формируется актив, складываются традиции, преобладающие мнения, стиль руководства становится более демократичным.

Третий этап: зрелость коллектива – основные черты: взаимная требовательность, самодисциплина, демократия и коллегиальность.

Формирование трудового коллектива означает следующие действия: планирование состава коллектива; обеспечение совместимости членов коллектива; проведение совместных корпоративных мероприятий и организация отдыха; введение работников в коллектив и их адаптация.

Сплоченность коллектива определяется единством формальной и неформальной структур. Формальная структура устанавливается существующими формами организации труда. Неформальная структура складывается в рамках формальной под воздействием функций выполняемых каждым членом коллектива и базируется на личных симпатиях, антипатиях, мнениях и представлениях.

Социально-психологическая структура коллектива и присущие им связи оцениваются социометрическими методами. Одним из путей оценки климата в коллективе является построение социоматрицы коллектива. На рис.1 представлена социоматрица, суть которой состоит в определении взаимных оценок внутри

коллектива путем ответов на соответствующие вопросы. Оценка может выставляться по самым разнообразным факторам и показателям, однако следует соблюдать служебный этикет и учитывать характер производственной или коммерческой направленности деятельности трудового коллектива.

Кто Кого	А	Б	В	Г	Д	Е	
А		-	+	0	0	-	1
Б	+		0	-	0	-	1
В	-	-		+	-	0	1
Г	-	-	+		+	+	3
Д	0	+	0	-		0	1
Е	-	-	-	0	-		0
	1	1	2	1	1	1	

Рисунок 1 - Социоматрица коллектива

Социоматрица заполняется путем регистрации взаимных оценок членов коллектива (А, Б, В, Г, Д, Е): положительное «+», отрицательное «-», нейтральное – 0. Суммируем по вертикали «+». Для оценки благоприятного климата с по-

мощью социоматрицы подсчитываются количество положительных оценок, которое делится на потенциально возможное их количество. Если полученный коэффициент меньше 0,66 или 2/3, то психологический климат считается не благоприятным.

Таким образом, совершенствование управления трудовым коллективом невозможно без исследования состояния морально-психологического климата коллектива. Особое внимание при формировании коллектива на предприятиях малого и среднего бизнеса следует уделять оптимальному сочетанию экономических и социально-психологических методов управления.

1. Армстронг, М. Практика управления человеческими ресурсами / М. Армстронг; пер. с англ. под ред. С.К. Мордовина. – СПб.: Питер, 2007. – 832 с.: ил. – (Серия «Классика МВА»).
2. Вязигин, А.В. Оценка персонала высшего и среднего звена / А.В. Вязигин. – М.: Вершина, 2006. – 256 с.
3. Стредвик, Дж. Управление персоналом в малом бизнесе / Дж. Стредвик; пер. с англ. под ред. В.А. Спивака. – СПб.: Издательский дом «Нева», 2003. – 288 с.
4. Уткин, Э.А. Управление персоналом в малом и среднем бизнесе / Э.А. Уткин. – М.: АКАЛИС, 2006. – 156 с.

УДК 336.16

## НАЛОГООБЛОЖЕНИЕ ДОХОДОВ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Леутина Л.И.

*Академия управления при Президенте Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь*

Определяющая роль в формировании и становлении многоукладной рыночной экономики принадлежит индивидуальному предпринимательству, призванному без существенных инвестиций заполнять свободные зоны рыночной экономики, создавать новые производства небольших размеров, сглаживать социальные проблемы, связанные с безработицей. Именно поэтому формирование и развитие в Республике Беларусь и в ее регионах достаточного слоя предпринимателей — не только

условие развития рыночной экономики, но и важнейший фактор решения острых экономических и социальных проблем переходного периода.

По состоянию на 1 января 2017 г. на учете в налоговых органах состояло около 236 тысяч индивидуальных предпринимателей. Их количество в разрезе республики, областей и г. Минска отражено в таблице [2].

Сведения о количество индивидуальных предпринимателей Республики Беларусь в 2015-2016гг.

Регионы	Количество индивидуальных предпринимателей по состоянию на 01.01.2016	Количество индивидуальных предпринимателей по состоянию на 01.01.2017	Динамика % роста (снижения)
Республика Беларусь	240 781	235 995	-2
Брестская область	33 886	32 597	-3.8
Витебская область	23 595	21 622	-8.4
Гомельская область	27 377	26 532	-3.1
Гродненская область	26 958	24 995	-7,3
Минская область	35 873	36 245	+1
Могилевская область	23 665	22 759	-3.8
г.Минск	69 427	71 245	+2.6

Как видно из таблицы, практически во всех регионах республики произошло снижение количества индивидуальных предпринимателей. Исключением является г. Минск и Минская область.

Индивидуальными предпринимателями в бюджет республики в 2016 году перечислено 429,9 миллионов рублей платежей, или 2,1 процента доходов бюджета, что на 0,1 процентного пункта меньше, чем в 2015 году. Темп роста поступлений в текущих ценах составил 102,0 процента. В расчете на одного индивидуального предпринимателя поступило 1,8 тысяч рублей, рост по сравнению с соответствующим периодом прошлого года на 4,1 процента [2].

В соответствии с действующими системами налогообложения, индивидуальные предприниматели могут применять одну из следующих систем: единый налог, упрощенная система налогообложения, общая система налогообложения [1]

Из всего количества индивидуальных предпринимателей почти 134 тысячи, или 56,7 процента, применяют упрощенную систему налогообложения. В бюджет от них поступило более 210,7 миллионов рублей, или 49,0 процента общей суммы уплаченных индивидуальными предпринимателями платежей, темп роста – 106,8 процента; в расчете на одного индивидуального предпринимателя – 1,6 тысяч рублей, темп роста – 106,1 процента. Данный факт объясняется следующими причинами:

- простота ведения учета;
- незначительные или вовсе отсутствуют расходы, связанные с осуществлением предпринимательской деятельности;
- определенные виды деятельности выведены из перечня видов деятельности по которым индивидуальные предприниматели уплачивают единый налог;
- удобство представления налоговых деклараций (расчетов), а именно один раз в квартал;
- нет необходимости пользоваться дорогостоящими услугами профессионального бухгалтера для ведения бухгалтерского учета;
- доступные условия перехода на применение упрощенной системы налогообложения и отказа в её применении.

Плательщиками единого налога являлось 88,7 тысячи человек, или 37,6 процента, ими перечислено в бюджет свыше 116 миллионов рублей, или 27,0 процента от общей суммы платежей индивидуальных предпринимателей, темп роста – 76,5 процента; в расчете на одного индивидуального предпринимателя – 1,3 тысяч рублей, темп роста – 82,3 процента. Данное снижение характеризуется прекращением деятельности индивидуальными предпринимателями, которые ранее

осуществляли розничную торговлю, которая не требовала наличия товарно-сопроводительных документов на реализуемый товар. Дальнейший ввоз товаров с 01.07.2014 должен осуществляться при наличии документов, подтверждающих их приобретение, что для стран Таможенного союза (в основном Российской Федерации) не урегулировано нормативными документами;

Подоходный налог с доходов от предпринимательской деятельности уплатили 13,5 тысяч человек (5,7 процента) в размере более 103 миллионов рублей (24,0 процента), рост по сравнению с аналогичным периодом прошлого года – в 1,4 раза; в расчете на одного индивидуального предпринимателя – 7,6 тысяч рублей, рост – в 1,3 раза [2]

Приведенные данные, бесспорно, свидетельствуют о возрождении и становлении предпринимательства как важнейшего элемента рыночной экономики. Они дают основание оценить предпринимательство как объективную реальность сегодняшней экономики.

Вместе с тем, многие характерные особенности становления предпринимательства в Республике Беларусь напрямую связаны с основными проблемами, мешающими развитию нормальных рыночных отношений и частного предпринимательства. К ним можно отнести:

- наличие нестабильного нормативно-правового поля привело к ориентации большинства субъектов малого предпринимательства на деятельность не в реальном секторе экономики, а в отрасли торговли и общественного питания, которая более быстро адаптируется к изменяющейся внешней среде;
- индивидуальные предприниматели не обладают финансовыми ресурсами достаточных объемов оборотного капитала, чтобы позволить себе воспользоваться услугами профессионального бухгалтера для ведения сложного бухучета;
- возникающие затруднения у индивидуальных предпринимателей при определении к какому из видов деятельности относится их деятельность и как при этом необходимо уплачивать налог;
- многие из разрешений, которые требуется получить для осуществления хозяйственной деятельности, фактически дублируют другие процедуры, такие как лицензирование, сертификацию и другие;
- негативное влияние на развитие предпринимательства оказывает отсутствие дифференцированных размеров штрафов и др.

В целях повышения эффективности налогообложения индивидуальных предпринимателей необходимо:

- совершенствовать организацию управления и контроля за налогоплательщиками;

- пропагандировать налоговые знания как среди населения, так и среди индивидуальных предпринимателей;

- оказывать достаточную государственную поддержку малому предпринимательству и объективно оценить его роль в рыночной экономике;

- целенаправленная налоговая политика местных органов власти и др.

Все вышеперечисленные очевидные позитивные изменения в области определения правил ведения бизнеса, а также в области налого-

обложения субъектов хозяйствования, направлены на улучшение делового климата и развития предпринимательства в Республике Беларусь.

1. Налоговый кодекс Республики Беларусь (Особенная часть): Кодекс Респ. Беларусь, 29 дек. 2009 г., №71-3 : в ред. Закона Респ. Беларусь от 30.12.2015 г. // Консультант Плюс : Беларусь. Технология 3000 [Электронный ресурс] / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2016.
2. Официальный сайт Министерства по налогам и сборам Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.nalog.gov.by/ru/svedeniya-predprinimatelstvo/](http://www.nalog.gov.by/ru/svedeniya-predprinimatelstvo/) Дата доступа: 5.04.2017.

УДК 330.322 (075)

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

Серченя Т.И., Родионова О.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Любое инвестиционное решение связано с необходимостью его обеспечения соответствующими финансовыми ресурсами. Выбор наиболее подходящих инструментов финансирования инвестиционных проектов зависит от финансового положения компании, внешних экономических условий, интересов владельцев ит.д. При этом основную роль играют следующие факторы:

- наличие на рынке необходимых финансовых продуктов;
- стоимость, сроки и условия финансирования;
- обеспечение, необходимое для привлечения средств;
- сроки организации и получения финансирования;
- затраты на привлечение инвестирования;
- вопросы контроля над предприятием.

Тремя основными классами источников финансирования инвестиционных проектов являются внутренние ресурсы компании, а также инструменты долевого и долгового финансирования. Однако у большинства фирм объемы внутренних источников недостаточны для реализации стратегически значимых и одобренных инвестиционных проектов. В связи с этим возникает необходимость привлечения дополнительных средств из внешних источников.

Фирмы могут привлекать долевые средства путем увеличения уставного капитала за счет дополнительных взносов учредителей или привлечения новых инвесторов путем продажи им части существующих или дополнительных выпусков акций, долей, паев.

Акционерные общества, испытывающие потребность в привлечении инвестиционных ресурсов, могут осуществлять первичное (Initial Public Offering – IPO) или дополнительное

(Secondary Public Offering – SPO) размещение акций путем публичного их предложения широкому кругу инвесторов.

Принятию решения о проведении IPO предшествует большая предварительная работа. Компании требуется осуществить необходимые структурные преобразования, провести аудит отчетности и систем внутреннего контроля за три-четыре года, предшествующих IPO, создать публичную кредитную историю, например, путем эмиссии облигаций.

В целом IPO – длительный, сложный и затратный процесс. Единовременные издержки по организации IPO, как прямые (оплата услуг финансового консультанта, андеррайтера, юридических и аудиторских фирм, биржи и т.п.), так и косвенные (расходы на реорганизацию систем управления и контроля), могут быть довольно значительными – от 7 до 20% от общего объема привлеченных средств.

Преимущества IPO заключаются в следующем:

- возможность привлечения значительных объемов денежных средств для реализации масштабных инвестиционных проектов;
- обращение акций компаний на бирже предоставляет собственникам более гибкие возможности для выхода из бизнеса и по более выгодной цене благодаря устранению «скидки за неликвидность»;
- акции не имеют фиксированной даты погашения – это постоянный капитал, который не подлежит возврату или погашению и не предполагает обязательных выплат акционеру, что повышает финансовую устойчивость компании;
- проведение IPO существенно повышает статус компании как заемщика (повышается кредитный рейтинг, и стоимость привлечения кредитов снижается на 2-3% годовых).

Недостатки IPO заключаются в следующем:

- сложность организации и проведения эмиссии, значительные расходы на ее подготовку (от 7 до 20% от общего объема привлеченных средств, включая косвенные расходы по реорганизации);
- длительность подготовки и проведения размещения (не менее года);
- необходимость публичного раскрытия информации о компании в соответствии с требованиями регуляторов;
- возможность потери контроля над компанией [1].

Традиционно процесс подготовки к проведению IPO состоит из нескольких этапов. На предварительном этапе проводится детальный анализ всех аспектов деятельности, по итогам которого эмитент пытается устранить выявленные недостатки. Далее идет подготовительный этап, в ходе которого выбирается торговая площадка и партнеры, с которыми окончательно согласовывается план действий.

После этого предприятие публикует аналитический отчет и объявление о своем намерении совершить первичное публичное размещение акций.

Последние этапы подготовки к IPO включают в себя сбор заявок на приобретение ценных бумаг, их удовлетворение и подведение итогов. Окончательная оценка успешности проведенной процедуры проводится только после начала обращения приобретенных ценных бумаг.

Механизм привлечения инвестиций IPO (первичное публичное размещение акций на фондовой бирже – прим. [soyuz.by](http://soyuz.by)) пользуется популярностью у предприятий по всему миру. Чего, к сожалению, не скажешь о Беларуси. Случаи проведения в стране публичного размещения акций единичны. По мнению экспертов, причина кроется в общей неразвитости фондового рынка. Сегодня дело к тому же усложняется непростой экономической ситуацией. И если несколько лет назад белорусские предприятия имели амбициозные планы по освоению механизма IPO, то сегодня смотрят на этот способ привлечения инвестиций скорее настороженно.

«Минский завод игристых вин» - один из успешных первоиспытателей народного IPO в Беларуси. Ведущий производитель игристых и шампанских вин в стране впервые разместил свои акции на бирже в 2012 году. В результате было реализовано 68,63 % акций от общего объема дополнительной эмиссии или 164 704 штуки на общую сумму 23,2 млрд.рублей. Полученные денежные средства были направлены на модернизацию производственных мощностей.

Однако на этом положительные примеры заканчиваются [2].

Поскольку низкая емкость отечественного фондового рынка не позволяет привлечь

значительные объемы средств наиболее крупным компаниям, некоторые эмитенты предпочитают проводить IPO на международных рынках в виде размещения депозитарных расписок на свои собственные акции. Под депозитарской распиской понимается сертификат, подтверждающий право его держателя на определенное количество депозитарных акций. Депозитарная акция – это ценная бумага, подтверждающая право собственности ее владельца на определенное количество акций иностранной компании, изъятых из обращения на внутреннем для эмитента фондовом рынке и депонированных в банке-кастодиане («хранителе»).

Преимущества выпуска депозитарных расписок заключаются в привлечении значительных средств для реализации стратегически значимых инвестиционных проектов, повышении капитализации и формировании международной деловой репутации, росте кредитоспособности компании и ее возможности осуществлять крупные займы на зарубежных рынках. Однако стоимость размещения депозитарных расписок высока, а само размещение доступно только крупным и сравнительно известным компаниям, также необходимо соблюдать жесткие требования регулятора в стране размещения.

Благодаря стратегическому партнерству Беларуси и Китая привлекательной для отечественных предприятий может стать именно Китайская фондовая биржа, так как по финансовым ресурсам она является одной из самых передовых.

Таким образом, перед размещением акций белорусских обществ на зарубежных биржах, прежде всего, необходимо провести реструктуризацию предприятия. Однако, для приведения компании в соответствие с международными стандартами, необходимы определенные финансовые затраты, пойти на которые многие белорусские предприятия просто не готовы.

По мнению международных экспертов, руководство страны уже сделало очень многое, чтобы обеспечить выход белорусского бизнеса на международную финансовую арену. Речь идет о дипломатических шагах, которые изменили позиционирование страны и упрочили ее репутацию как надежного делового партнера. Однако, этого недостаточно. Требуется еще большее реформирование этой сферы, так как публичное размещение акций белорусских компаний на фондовой бирже – успешный шаг на пути к созданию рыночной модели экономики, которая для нашей страны означает больше, чем просто привлечение дополнительных средств.

1. Мельников, Р. М. Экономическая оценка инвестиций: учебное пособие. – М.: Проспект, 2017. – 261 с.
2. *IPO в Беларуси: выиграть нельзя проиграть* [Электронный ресурс]// Информационно – аналитический портал Союзного государства URL: <http://www.soyuz.by>. – Дата обращения: 13.09.2017.

## ФОРМЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТОРГОВЛИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Козленкова О.В., Кузнецова О.А.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

С проникновением в оптовую торговлю промышленных фирм ими создавался собственный торговый аппарат. Таковы в США оптовые филиалы промышленных фирм: оптовые конторы, занятые информационным обслуживанием различных клиентов, и оптовые базы. У крупных фирм ФРГ имеются собственные отделы поставок, специальные бюро или отделения сбыта, оптовые склады. Промышленные компании создают дочерние общества для сбыта своей продукции фирмам и могут иметь свою оптовую сеть.

Важный параметр в оптовой торговле - соотношение универсальных и специализированных оптовых фирм. Всеобщей можно считать тенденцию к специализации: в специализированных фирмах производительность труда значительно выше, чем в универсальных. Специализация идет товарному и функциональному (т.е. ограничение функций, выполняемых оптовой фирмой) признаку.

Особое место в оптовой торговле занимают товарные биржи. Они похожи на торговые дома, где торгуют различными товарами, причем как оптом, так и в розницу. В основном товарные биржи имеют свою специализацию. Публичная биржевая торговля основана на принципах двойного аукциона, когда увеличивающиеся предложения покупателей встречаются со снижающимися предложениями продавцов. При совпадении цен предложений покупателя и продавца заключается сделка. Каждый заключенный контракт публично регистрируется и доводится до сведения публики через каналы связи.

В развитых странах бирж реального товара почти не осталось. Но в отдельные периоды при отсутствии других форм организации рынка, биржи реального товара могут играть заметную роль. Институт биржи не потерял своего значения для международной торговли, в связи с превращением из биржи реального товара в рынок прав на товар, или в так называемую фьючерсную биржу.

Фондовые биржи. Торговля ценными бумагами ведется на международных денежных рынках, то есть на биржах таких крупных финансовых центров, как Нью-Йорк, Лондон, Париж, Франкфурт-на-Майне, Токио, Цюрих. Торговля ценными бумагами производится в так называемое биржевое время.

В данное время торговля ценными бумагами как на внутреннем, так и на внешнем рынке приобретает огромное значение для развития мировой торговли в целом. Объемы оборота в рамках этой формы международной торговли неуклонно возрастают, хотя она и подвержена сильному влиянию внешнеполитических факторов.

Ярмарки. Одним из наилучших путей поиска контакта между производителем и потребителем являются ярмарки и выставки. На тематических ярмарках производители выставляют на выставочных площадях свои товары, а потребитель имеет возможность выбрать, купить или заказать необходимый ему товар прямо на месте. Ярмарка представляет собой обширную выставку, где стенды с товарами и услугами распределены согласно тематике, отрасли, назначения и т.п.

Во Франции многочисленные отраслевые выставки организуются организаторскими обществами, в большинстве случаев не располагающими своими ярмарочными территориями, принадлежащими торгово-промышленной палате. В ярмарочном хозяйстве Италии крупнейшей ярмарочной компанией является Миланская ярмарка, не имеющая конкурентов по своему годовому обороту, который составляет 200–250 миллионов евро. На ярмарках Великобритании выделяются две крупные, действующие и за пределами страны, компании - «Рид» и «Бленхейм», годовой оборот которых колеблется в пределах от 350 до 400 миллионов евро. Однако значительная часть своего оборота они получают и за пределами Великобритании. По официальным данным, около 30 процентов внешней торговли Италии производится через ярмарки, в том числе 18 процентов через Миланскую. Она имеет 20 представительств за рубежом. Доля иностранных участников и посетителей в среднем составляет 18 процентов. Ярмарки в Германии в целом занимают ведущее место в Европе. За последнее время годовой оборот, к примеру, Берлинской ярмарки превышает 200 миллионов евро и имеет устойчивую тенденцию к росту.

Роль ярмарок в будущем не уменьшится, а, напротив, возрастет. С развитием международного разделения труда, которое еще больше углубится благодаря свободному товарообмену в Европе. За некоторыми

исключениями посетителям и участникам Европейских ярмарок не создавалось никаких помех и ограничений.[7]

Существенные сдвиги произошли в структуре мировой торговли: увеличилась доля готовых изделий и сократился удельный вес продовольствия и сырья, кроме топлива.

В экспорте промышленно развитых стран растёт доля высокотехнологичной продукции, которая в США, Швейцарии и Японии составляет свыше 20%, Германии и Франции - около 15%. Особенно быстро растёт торговля изделиями микроэлектроники. По этой позиции с недавнего времени начинает лидировать Китай.

Анализ направлений торговли позволяет выявить, что опережающими темпами растёт взаимная торговля промышленно развитых стран, на которые приходится почти 60% мирового экспорта. Внешнеторговые связи концентрируются в рамках монополистических объединений.

В целом, можно отметить, что за прошедшее время изменился сам характер мирового рынка. На него поступают теперь уже не излишки внутреннего производства, а заранее согласованные поставки конкретному покупателю.

Мировая торговля до сих пор встречает на своём пути множество препятствий. Хотя при этом, ввиду всеобщей тенденции к мировой интеграции, создаются всевозможные торговые и экономические объединения государств для облегчения осуществления международной торговли. В современных условиях активное участие стран в мировой торговле связано со значительными преимуществами: оно позволяет более эффективно использовать имеющиеся в стране ресурсы, приобщиться к мировым достижениям науки и техники, в более сжатые сроки осуществить структурную перестройку своей экономики, а также более полно и разнообразно удовлетворять потребности населения. Кроме того, мировая торговля способствует углублению интернационализации производства, международной экономической интеграции и глобализации. Исходя из этого, изучение её современного положения и рассмотрение перспектив её развития необходимо для построения внешнеэкономической стратегии как на макро-, так и на микроуровне. Это означает, что не только государства

должны иметь свою программу поведения на международном рынке товаров и услуг, но и сами предприятия и организации, работающие на этом рынке должны иметь стратегические концепции функционирования и поведения в меняющихся условиях.

Внешняя торговля, особенно в странах с открытой экономикой, где высока доля продукции, реализуемой на мировых рынках, оказывает огромное влияние на общее состояние экономики. Динамика развития международной торговли характеризуется стремительным ростом объёмов товарооборота в последнее десятилетие. Это обусловлено как ростом экономического, так и научно-технического потенциала большинства государств. В растущем многообразии форм международной торговли весомое положение начинает занимать внутрикорпоративная торговля ТНК. Структурные сдвиги, происходящие в экономике стран под влиянием НТР, специализация и кооперирование промышленного производства способствуют активизации международной торговли. Объёмы международной торговли, движущей все международные товарные потоки, растут быстрее производства. Географическая структура международной торговли также изменяется: основной товарооборот развивающихся стран направляется на развитые, они же в свою очередь торгуют по большей части между собой, переориентируясь при этом все в большей степени на рынок услуг, развивают сферу международного туризма. Существенную роль в регулировании внешней торговли играет Всемирная торговая организация, а также различные товарные договоры и межправительственные торговые соглашения, заключаемые на двусторонней основе.

Таким образом, подводя итоги, можно сказать, что в динамике наблюдается стремительный рост объёмов международной торговли, а доля готовой продукции в нём неуклонно растёт. Структура международной торговли, как географическая, так и товарная постоянно меняется, представляя собой в данный момент систему из двух элементов: развитые страны, торгующие в основном между собой, и развивающиеся страны, поставляющие свою продукцию в развитые страны.

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАСТЕРНОЙ ПОЛИТИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Гурина Е.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В экономике современного мира наиболее важным условием, обеспечивающим успешное и устойчивое развитие, является способность адаптации к международной конкуренции, создание механизмов, которые в последствии будут способствовать поиску перспективных внешних рынков и развитие внутренних факторов, повышающих эффективность производства.

Достойное место в мировом сообществе могут занять только те страны, которые выбирают для себя инновационный путь развития, обеспечивающий модернизацию экономики и улучшение качества поставляемой продукции и услуг, что влечет за собой рост конкурентоспособности предприятия в целом.

Для обеспечения своевременной модернизации экономики в данный момент используется кластерное развитие, которое помогает противостоять глобальной конкуренции и надлежащим образом отвечает требованиям национального и регионального развития. По опыту развитых стран, благодаря кластеризации усиливается конкурентоспособность и ускоряется инновационная деятельность. Поэтому базовым элементом успешных стратегий развития большинства стран является повышение конкурентоспособности посредством кластерных инициатив.

Кластер – группа географически соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере и характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга. Назначение кластеров – обеспечивать, по возможности, создание целостного продукта и соответствующей конкурентной среды.

Кластер, являясь социально-экономическим явлением и территориально-хозяйственной системой, имеет свои преимущества и недостатки.

Что касается преимуществ. Существует возможность экономии ресурсов благодаря проведению совместных мероприятий участников кластера. Во-вторых, развивается взаимодополняемость между отраслями и секторами; ускоряется распространение технологий, навыков, информации между участниками кластера; возрастает степень понимания требований заказчиков, потребителей, клиентов к продукции и услугам фирм и организаций региона. В-третьих, обеспечивается возможность ведения конструктивного и эффективного диалога между: родственными компаниями и их поставщиками; властью и бизнесом; наукой и бизнесом; университетами и бизнесом. В-четвертых, экономическая политика фокусируется на повышении региональной

привлекательности и конкурентоспособности. В –пятых, четко определяются особые задачи и функции власти и бизнеса в совершенствовании кластеров. Данный набор дополнительных региональных конкурентных преимуществ обеспечивает: повышение производительности входящих в кластер фирм и организаций; формирование и развитие способности к инновациям и, таким образом, к повышению производительности; стимулирование создания новых бизнесов, поддерживающих инновации и расширяющих границы кластера

Анализ мировой практике в области формирования и реализации стратегий кластерного развития позволяет сделать ряд определенных выводов:

1. Использование кластерного подхода является обоснованным этапом в развитии экономики, а его распространение можно рассматривать в качестве основной черты всех высокоразвитых экономик.

2. Кластерный механизм повышения конкурентоспособности основан на эффективном сочетании внутрикластерной кооперации в процессе производства продукции с внутренней конкуренцией в рамках промышленного кластера. При этом необходимо подчеркнуть сетевой характер взаимодействия его участников, поскольку именно горизонтальная интеграция в данном случае способствует формированию строго ориентированной цепочки распространения новых знаний, технологий и инноваций

3. Чертой, которая отличает кластер является его инновационная ориентированность. В связи с этим кластерный подход используют как развитые страны, так и развивающиеся, что способствует формированию и регулированию своих национальных инновационных программ.

4. Проведение кластерной политики базируется на организации взаимодействия между органами государственной власти и местного самоуправления, бизнесом и научно-образовательными учреждениями для координации усилий по повышению инновационности производства и сферы услуг, что способствует взаимному совершенствованию и повышению эффективности в работе.

Конкурентоспособные кластеры часто имеют развитые связи со сходными кластерами в других регионах и странах. Стимулирование подобных международных связей становится важным направлением кластерной политики и заключается в развитии кооперации между

родственными кластерами, разработке и реализации программ развития сотрудничества.

Особое значение кластерный подход имеет для малых предприятий. Некоторые исследователи видят единственный способ сохранения малых фирм в условиях глобализации и возрастающей международной конкуренции в объединении их в кластеры.

Основой программ ЮНИДО по развитию кластеров предприятий является понимание того, что эти предприятия могут играть решающую роль в экономическом развитии развивающихся странах. Однако, их роль часто не может быть реализована из-за ограничений, связанных с размером предприятий. Зачастую, малые предприятия не могут удовлетворить потребности рынка, который нуждается в большем количестве продукции, следовании стандартам и в регулярных поставках. Развитие кластеров малых предприятий может осуществляться спонтанно или организовано. Большинство контрактов заключается региональными фирмами с одними и теми же поставщиками и потребителями. Это стихийно формирует некий круг взаимосвязанных предприятий-партнеров, работающих в местных цепочках. Успешное создание кластеров возможно даже в том случае, если предприниматели никогда ранее не имели деловых контактов между собой.

Основа кластеризации промышленности территории – модернизационный процесс, базирующийся на инновациях. Структурно он охватывает технические, технологические, организационно-управленческие и институциональные нововведения.

Содержанием современной промышленной политики должна стать организация и поддержка промышленных кластеров – как основы будущей конкурентоспособности экономики территории.

Мировой опыт показывает, что создание кластеров – затратный процесс, в котором примерно половину финансирования принимает на себя государство (за счет федерального и регионального бюджетов). Но это не исключает развитие новых механизмов финансирования. Например, возможно привлечение банками

средств населения с длительными сроками заимствования, а также развитие механизмов аутсорсинга, субконтрактинга.

Для организации промышленных кластеров необходимо наличие на территории крупных современных исследовательских университетов, способных составить конкуренцию зарубежным образовательным учреждениям на рынке образовательных услуг и инновационных разработок.

Преимущества кластерной промышленной политики многообразны. В результате ее реализации администрации территорий лучше видят сильные и слабые стороны промышленного развития, усиливается их партнерский диалог с бизнесом, диверсифицируется региональная экономика. Все это ведет к росту числа налогоплательщиков и налогооблагаемой базы, снижению зависимости бюджетов от отдельных бизнес-групп. Кластерный подход сулит выгоду и бизнесу: он более полно использует кадровый потенциал и инфраструктуру территории, имеет доступ к исследованиям и рекомендациям научных центров, благодаря которым снижаются издержки, обеспечивается выход на новые рынки.

На данным момент в Республике Беларусь начинается процесс кластеризации экономики, который предусматривает переход национальной экономики на путь инновационного развития. Одним из перспективных направлений этого развития является внедрение в практику хозяйствования и управления кластерной модели развития, которая предполагает широкое распространение такой формы интеграции науки, образования и производства, как кластеры.

Экономика, основанная на кластерах, - модель конкурентоспособной и инвестиционно-привлекательной экономики, обеспечивающей высокий уровень и качество жизни населения и вовлекающей в процесс производства не только крупные предприятия региона, но и малый и средний бизнес, - то, к чему и стремиться на данном этапе наша страна.

1. Постановление Совета Министров Республики Беларусь 16 января 2014 г. N 27 «Об утверждении концепции формирования и развития инновационно-промышленных кластеров в Республике Беларусь и мероприятий по ее реализации»[Текст]:Минск.
2. Крупский, Д. М. Руководство по созданию и организации деятельности кластеров в Республике Беларусь [Текст]: Минск, 2015. – 4 с.

УДК 658.14

## ВЕНЧУРНОЕ ФИНАНСИРОВАНИЕ

Гурина Е.В., Дробышева К.В., Сычев Д.Р.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В наше время в высокоразвитых странах широкое распространение получает венчурное финансирование. Его суть заключается в долгосрочных (5-7 лет) высокорисковых

инвестициях частного капитала в акционерный капитал вновь создаваемых малых высокотехнологичных перспективных компаний, ориентированных на разработку и производство

научоёмких продуктов, для их развития и расширения, с целью получения прибыли от прироста стоимости вложенных средств.

Главная проблема молодых фирм, которые внедряют инновации, – отсутствие уверенности в том, что их начинания увенчаются успехом. Из-за высоких рисков, которым подвергаются подобные компании, им крайне сложно получить кредиты. Дополнительные трудности возникают также из-за того, что потенциальные инвесторы далеко не всегда полностью осведомлены о проектах, которые запланировали новаторы. Однако такие компании все же могут получить необходимые средства. Для этого им нужно прибегнуть к венчурному финансированию.

**Венчур** (англ. *venture, ventures*) - связанный с риском. Характерные особенности венчурных инвестиций: инвестиции предоставляются новым компаниям или уже существующим, но обладающими существенным потенциалом роста; одним из основных критериев целесообразности предоставления венчурных инвестиций является опыт менеджеров проекта (и, разумеется, грамотно составленный бизнес-план), так как никаких «железных» гарантий успешности развития финансируемого проекта, в принципе, быть не может; средний предполагаемый срок окупаемости проекта обычно составляет 3-7 лет; развившись в полную силу, проект, под который изначально привлекались венчурные инвестиции, переходит на другие источники финансирования; средний размер венчурных инвестиций составляет \$500 тыс.–\$5 млн. [1]

История венчурного финансирования зародилась в США. Ее основателем принято считать генерала Джорджиза Дориота. В 1946 году Дориот основал Американскую Корпорацию Исследований и Развития (АКИР), величайшим успехом которой стала Диджитал Эквипмент Корпорейшн. Когда Диджитал Эквипмент распространила свои акции на бирже в 1968 году, она обеспечила АКИР рентабельность 101 % в год. 70 тысяч долларов, которые АКИР инвестировала в Диджитал Корпорейшн в 1959 году, имели рыночную стоимость 37 миллионов долларов в 1968 году. Принято считать, что первой компанией, которая была создана венчурным финансированием, является Фэйрчайлд Семикондактор, основанная в 1959 году фирмой Венрок Эсоушиэйтс.

Развитие Силиконовой долины оказало непосредственное влияние на становление венчурного финансирования. Во время 60-х и 70-х гг. XX в. венчурные фирмы сфокусировали свои инвестиции главным образом на компаниях на начальной стадии развития и на стадии расширения. Как правило, эти компании использовали достижения в электронных и информационных технологиях, а также в технологиях в области медицины. В результате

венчурное финансирование стало синонимом финансирования технологий. В 1974 году венчурные фирмы пережили временный спад из-за того, что рухнула фондовая биржа, и, естественно, инвесторы настороженно относились к этому новому типу инвестиционного фонда. Показатели 1978 года стали рекордно высокими для венчурного капитала. Доходы этой индустрии в 1978 году составил 750 миллионов долларов.[2]

Самым успешным проектом за всю историю венчурного инвестирования является компания Cisco Systems, один из мировых лидеров производства сетевых маршрутизаторов и телекоммуникационного оборудования. В 1987 году Дон Валентин приобрел за 2,5 млн. долларов пакет акций Cisco. Через год стоимость его пакета составила 3 млрд. долларов. Кроме этого, такие компании, как Microsoft, Intel, Apple Computers, Sun Microsystems, на этапе их возникновения были профинансированы именно венчурными фондами. [3]

На сегодняшний день большой популярностью пользуется криптовалюта. Наиболее ярким представителем рынка криптовалют является биткоин. Началом истории биткоина принято считать 2008 год, когда в Интернете появился документ с описанием криптовалюты, опубликованный под именем Сатоши Накамото. 2009 год – начало добычи (майнинга) криптовалюты. В 2010 году был создан первый обменник, где можно было обменять биткоины на доллары. Этот же год был ознаменован первым приобретением, при котором платежным инструментом выступали биткоины, а именно – один пользователь системы приобрел у другого две пиццы. Стоимость покупки составила 10 000 биткоинов (в переводе на доллары по текущему курсу, это примерно 25 долларов). Всего через несколько месяцев после этой знаменательной покупки курс биткоина значительно вырос, за 10 тысяч биткоинов давали уже 600 долларов. Столь стремительный рост курса связывают с публикацией о новой платежной системе на сайте Slashdot, через несколько часов после публикации курс криптовалюты вырос примерно в 10 раз. В июле 2010 начала работу первая биткоин-биржа MtGox.

В ноябре 2011 года объем торгов MtGox достиг предела в 1 млн долларов США. В сентябре 2012 был создан Фонд Биткоина. Биткоин продолжал развиваться, несмотря на риски, связанные с неустойчивым положением на фондовом рынке. Он стал своеобразным объектом венчурного инвестирования, достигнув своего пика в 2017 году. На 17 сентября 2017 года стоимость 1 биткоина достигла 3573,47 долларов США. С 1 июля 2017 года Австралия официально признала биткоин платежным средством. Кроме

того, в Китае создаются «фермы» по добыче биткоина, что доказывает его актуальность.

Биткоин является одним из самых ярких примеров венчурной сделки. На сегодняшний день в мире существует более 800 криптовалют. Торговля криптовалютой обладает существенным риском. Ее стоимость не обеспечивается никаким государством или центральным банком, способным повысить ликвидность и доступность на рынке. Виртуальная валюта обладает риском полного обесценения в случае потери доверия к ней пользователей, которое может быть подорвано действиями разработчиков, изменением программной поддержки, появлением альтернативных валют, ограничениями и запретами на криптовалюты, вводимыми различными государствами. Кроме того, доверие к валюте может снизиться из-за системных технических проблем, действий хакеров. Ввиду этого при торговле криптовалютой существует высокий риск и возможность потерять все вложенные в него средства. [4]

Несмотря на множество рисков, связанных с нестабильностью биткоина, люди продолжают вкладывать деньги в виртуальную валюту, что способствует дальнейшему развитию венчурного финансирования. Развитие венчурной экосистемы в Республике Беларусь – один из способов, стимулирующих развитие новых сегментов и отраслей. С этой целью в 1998 г. был создан Белорусский инновационный фонд. БИФ – государственная организация, подведомственная структура Государственного Комитета по науке и технологиям. Это не венчурный фонд, но до недавних пор он был единственным, кто содействовал инновационному развитию белорусской экономики – прежде всего, за счёт финансовой поддержки проектов.

По инициативе БИФ, озвученной в 2015 году, был создан Белорусско-российский венчурный фонд. Формирование фонда ориентировано на то, чтобы внедрять в Беларусь современные рыночные механизмы финансирования инновационных проектов. Объём фонда составляет 25 миллионов долларов США. Вклады

сделаны с двух сторон по 50 %, с российской стороны партнёрами выступили российская венчурная компания и её дочерняя компания Инфрафонд РВК. Договор инвестиционного товарищества подписан в конце декабря 2016 года, фонд на данный момент создан в российской юрисдикции, на территории российской федерации. В середине мая БИФ объявил о планируемом Белорусско-китайском венчурном фонде «Великий камень». В него войдёт три компании: Белорусский инновационный фонд, «Чайна Мерчантс Капитал» и СЗАО «Компания по развитию индустриального парка». Сейчас стороны согласовывают юридические условия — ожидается, что фонд начнёт работу до конца 2017 года. «Великий камень» должен стать настоящим эко-городом, где сосредоточены инновационные производства с высоким экспортным потенциалом, действует особый правовой режим и обеспечены оптимальные условия для ведения бизнеса.

Рассмотрев вопрос о развитии венчурного капиталовложения, плюсы и минусы венчурных сделок, мировой опыт финансирования, можно прийти к выводу, что рост популярности криптовалюты, разработка инновационных проектов, поиски новых путей сотрудничества Белорусского инновационного фонда с другими странами способствует развитию и закреплению венчурного финансирования в качестве основного способа привлечения инвестиций.

1. Нехорошев Л.Н. Венчурные фонды как инструмент привлечения инвестиций в высокотехнологичный сектор / Л.Н.Нехорошев, С.А.Егоров // Материалы X Международного симпозиума «Технологии – Оборудование – Качество». Минск, 15-18 мая 2007 г.
2. Ивина Л.В., Воронцов В.А. Терминология венчурного финансирования. Учебное пособие для вузов. – М.: Академический проект, 2002.
3. Ягудин С.Ю. Венчурное предпринимательство – М.: Книга по Требованию, 2011.
4. История создания Биткоина [электронный ресурс]. URL: <http://finansy.name/kriptovaljuta/istorija-sozdaniya-bitkoina.html>.
5. Белорусский инновационный фонд. [электронный ресурс]. URL: <http://startuplife.by/bventure-four.html>.

УДК 336

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**Мелюшин В.П., Ворошина Е.В., Афанасенко А.В.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В работе исследуется влияние инноваций и научно-технического прогресса на экономический рост. На основе изучения моделей экономического роста, с привлечением как теоретического материала, так и экспериментальных данных

представлены факторы роста, детерминанты инновационной деятельности и инструменты моделирования.

Один из наиболее существенных источников

экономического роста – научно-технический прогресс (НТП), отражающий уровень технического, технологического и социального развития страны. В литературе исследуются 145 факторов влияющих на экономический рост в регионе.

Модель прогноза эффективности инноваций. Исследование экономического роста является в настоящее время одной из самых востребованных направлений в экономической литературе, так как его результаты важны для правильного проведения экономической политики и развития страны в целом

Предлагаемая концепция прогноза эффективности инноваций базируется на модели предложенной Эрроу-Ромера [5]. В работе [5] исследуется экономический рост на основе технического прогресса, который является следствием результата обучения работников в процессе деятельности. Потенциал экономики формируется под действием целого ряда факторов таких как капитал, инновации и текущий уровень развития технологий.

Технический прогресс зависит от объема знаний работников, приобретенных в процессе работы, который в свою очередь зависит от задействованного капитала. Составными частями модели прогноза эффективности инноваций в процессе деятельности [5] являются: производственная функция, человеческий капитал, объем знаний работников, инвестиции и производительности труда.

1) производственная функция мирового объема производства Объем  $Y_t$  имеет форму

$$\text{Объем } Y_t = A + B \cdot K_t + C \cdot L_t,$$

где  $L_t$  – производительность труда;  $K_t$  – капитал задействованный в экономике;  $A, B, C$  – коэффициенты уравнения.

2) Важным интенсивным фактором роста и развития современной инновационной экономики является человеческий капитал [6]. Капитал включает не только физический, но и интеллектуальный человеческий капитал. Симбиоз физического капитала и продукта инвестиций в научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки [5] позволяет учитывать эффект «обучения на опыте» [6].

Обобщенный показатель человеческого капитала – индекс развития человеческого потенциала (ИРЧП). Уровень жизни, оцененный через ВНД на душу населения по паритету покупательной способности (ППС) в долларах США. На основе обработки исходных данных по методике ООН [3] для расчета индекс развития человеческого потенциала получено уравнение:

$$\text{ИРЧП} = -10.269 + \text{год} * 0.00542 ;$$

Получено по отчетным данным для ИРЧП за 1980-2015 годы. Усредненное отклонение фактических данных от расчетных 0.912%. Наличие положительной корреляции зависимости между показателями ИРЧП и

экономическим ростом установлено в работах [6]. Влияет на роста ИРЧП величина инвестиций в экономику [7].

$$\text{ИРЧП} = f(\text{Инвестиции}).$$

3) Объем знаний работников связан с обучением на собственном опыте. При этом рост объема знаний зависит от чистых инвестиций. Показателем уровня знаний и опыта является количеством патентов, которые связаны с инвестициями в физический капитал, что предложено в работе [8];

$$\text{Пат} = f(\text{Инвестиции}).$$

4) Увеличение капитала происходит за счет инвестиций, впервые представлена в работе [9].

$$\text{Инвестиции}_t = Y_{t-1} - s \cdot Y_{t-1}$$

где  $s$  – величина накопления сбережений. Динамика сбережений рассчитана на основе экстраполяции отчетных данных [2];

$$\text{сбережения} = f_t.$$

Динамика капитала рассчитана по данным [2].

$$\text{Капитал} = f(\text{Инвестиции}).$$

5) Интегрированный показатель производительности труда в реальном секторе зависит от человеческого капитала и знаний работников, приобретенных в процессе работы.

В работе [9] проверяется эта гипотеза с помощью оценки корреляции производительности труда в реальном секторе. Коэффициент корреляции между темпами роста экономики и производительности труда в промышленности оказался практически равен единице, что свидетельствует о сильной связи между этими двумя показателями. Производительность труда  $KL$  определялась как функция числа патентов и ИРЧП.

$$KL = f(\text{Патенты}, \text{ИРЧП}).$$

В работе предложен инструмент выявления сложных скрытых зависимостей между входными данными и выходными на основе нейронной сети. Построение нейросетевой модели функционирования экономического объекта реализуется на основе системы взаимосвязанных нейронов.  $f_0(x), f_1(f_1-1), \dots, f_m(f_m-1)$ .

В экспериментальные расчеты заимствованы отчетные данные Международного Валютного Фонда (МВФ), International Bank for Reconstruction and Development/The World и World Intellectual Property Organization. Данные в вычислениях приводятся в том виде, как они представлены в электронной версии, имеющейся в электронной библиотеке Международного Валютного Фонда (МВФ) ([www.elibrary.imf.org](http://www.elibrary.imf.org)) и на сайте МВФ в Интернете ([www.imf.org](http://www.imf.org)).

Нейронная сеть выявляет сложные скрытые зависимости между входными и выходными данными.

Для приведенной экономической постановки функционирование нейронной сети реализуется по следующей системе уравнений:

$$I = f(\{Y_{t-1}, C\});$$

$$\begin{aligned}
 K &= f(I); \\
 \text{ИРЧП} &= f(I); \\
 П &= f(I); \\
 \text{KL} &= f(\text{Пат}, \text{ИРЧП}); \\
 \text{Объем-} Y &= F(K_{\{i\}}, \text{KL}_{\{i\}}); \\
 C &= F\{t\}.
 \end{aligned}$$

где И – Инвестиции; К – капитал; П – патенты; Производительность труда – KL; Объем – Y; Сбережения – C.

Алгоритм создает локальную систему уравнений таблицы исходных данных для прогноза на 2017 года.

Расчет прогнозных данных выполняется по системе уравнений полученных для данных обучающего интервала:

$$\begin{aligned}
 I &= f(Y, s) = -19.0 + 0.24 * Y(t-1) + 2.165 * C; \\
 K &= f(I) = -1.999 + 1.045 * I; \\
 \text{ИРЧП} &= f(I) = 0.486 + 0.00289 * I; \\
 П &= f(I) = -2700 + 96.94 * I; \\
 \text{KL} &= f(П, \text{ИРЧП}) = 391.15 + 0.0367 * П + 1254.8 * \text{ИРЧП}; \\
 Y &= F(K_{\{i\}}, \text{KL}_{\{i\}}) = 3.73 + 0.42 * K + 0.03665 * \text{KL};
 \end{aligned}$$

$$C = F\{t\} = -401.1 + 0.212 * t.$$

Проведено исследование прироста инвестиций в % от 0 до 10. По системе предложенных моделей для 2017 года при величине сбережения (в процентах от ВВП) спрогнозированных по уравнению: сбережения =  $F\{t\} = -401.1 + 0.21 * t$ .

Оценка прироста проведена в % ВВП мирового объема производства к предыдущему году.

Минимальный положительный прирост ВВП в мировом объеме производства начинается с прироста инвестиций с 4%. Эта величина внутренних потерь для нулевого роста экономики. Объем производства на душу при 10 % прироста инвестиций составит 1364.2\$, а индекс развития человеческого потенциала составит 0.6722.

УДК 388.46

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ПЕРСОНАЛОМ

Третьякова Е.С.<sup>1</sup>, Третьяков-Савич Е.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Каунасский технологический университет, Каунас, Литовская Республика

В современных экономических условиях одним из решающих факторов повышения эффективности деятельности любого предприятия является поиск путей активизации человеческого потенциала, инновационные подходы к управлению персоналом основываются на учете специфики человеческих ресурсов.

Ранее, несмотря на то, что каждая организация имела функциональную подсистему управления кадрами, это управление входило в компетенцию руководителя подразделения. Отдел кадров выполнял лишь функции планирования трудовых ресурсов, приема и увольнения работников, организации обучения; функционально он не был

**Выводы и предложения.** Нейронная сеть выявляет сложные скрытые зависимости между входными и выходными данными.

На основе отчетных динамических рядов для каждого нейрона сохраняются коэффициенты уравнений которые определяются на обучающем интервале. Проверки адекватности прогноза целесообразно проводить алгоритмом динамически изучая набор моделей. Критерий адекватности- близость фактических и расчетных данных на проверочном интервале. Предлагаемая технология функционирования нейронной сети позволяет оценить влияние инноваций на тенденции в экономическом росте.

1. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. 2016. [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).
2. Перспективы развития мировой экономики: слишком долгий период слишком медленного роста. International Monetary Fund, [www.imfbookstore.org](http://www.imfbookstore.org), [www.elibrary.imf.org](http://www.elibrary.imf.org)
3. World Intellectual Property Organization (WIPO). <http://www.wipo.int/portal/en/>
4. Human Development Report. Published for the United Nations Development Programme (UNDP). <http://hdr.undp.org>.
5. Paul M. Romer, Increasing Returns and Long-Run Growth. The Journal of Political Economy, Vol. 94, No. 5, (Oct., 1986)
6. Ciccone A., Papaioannou E. 2009. Human Capital, the Structure of Production and Growth. The Review of Economics and Statistics, Vol. 91, No. 1, February.
7. Barro R. 1999. Inequality, Growth and Investment: NBER Working Paper. No. 7038.
8. Schmoockler J. [en] Invention and Economic Growth // Cambridge, MA: Harvard University Press. — 1966. — P. 332. — ISBN 9780674432833.
9. Michalopoulos S., Laeven L., Levine R. 2009. Financial Innovation and Endogenous Growth. NBER Working Paper. — No. 15356.
10. Attfield C., J. Temple. Balanced growth and the great ratios: new evidence for the US and UK, Journal of Macroeconomics, 2010. 32 (4), 937 – 956.

связан с основными подразделениями предприятия и не обладал профессионализмом для обеспечения оптимального функционирования персонала.

По мере ослабления централизованной системы управления экономикой перед предприятиями начали возникать принципиально новые задачи, связанные с управлением человеческими ресурсами. Это связано с тем, что быстрое изменение внешней среды и возрастание роли человеческих ресурсов как стратегического фактора для предприятий требует учета таких тенденций в управлении персоналом как: увеличение ценности квалифицированных работников;

расширение прав и повышение ответственности исполнителей путем децентрализации функций управления; совершенствование системы планирования карьеры, выявление у работников управленческих наклонностей; тесная взаимосвязь кадровой стратегии со стратегическими планами предприятия; создание корпоративной культуры с технологиями непрерывного обучения и развития персонала.

В настоящее время кадровые службы преобразуются в службы управления персоналом, повышение их роли обусловлено: переходом от дефицита к избытку трудовых ресурсов; возрастанием интенсивности труда, требующего высокой квалификации; расширением функциональных обязанностей работников, повышением их самостоятельности. На современных предприятиях отделы кадров интегрируются в систему общего руководства и стратегического планирования. У службы управления персоналом появился ряд новых функций, таких как: формирование политики развития персонала; обеспечение высокого уровня профессионализма кадровых вопросов; выявление проблем в сфере использования трудовых ресурсов и привлечение к ним внимания руководителей различного уровня для принятия соответствующих решений.

Существенно изменились задачи, стоящие перед службой управления персоналом. К ним можно отнести: определение текущей и перспективной потребности в персонале; изучение и анализ рынка труда; профессиональный отбор, контроль за текучестью кадров; развитие персонала, формирование резерва, разработка индивидуальной карьеры сотрудников; стимулирование высокой производительности; анализ и регулирование групповых и личных отношений; управление конфликтами; оценка и подбор кандидатов на вакантные должности; управление трудовой мотивацией; регулирование правовых вопросов трудовых отношений; обеспечение участия работников в управлении; информационное обеспечение систем управления персоналом.

Решение этих задач требует совершенно иных инновационных навыков, чем те, которых было достаточно для ведения документации, составления отчетов и выдачи справок, подготовки приказов руководителя по личному составу. Чтобы успешно развиваться, организация должна управлять подбором, обучением, оценкой и вознаграждением, т. е. быть способной создать, использовать и совершенствовать особые методы, процедуры, программы организации этих процессов. Взятые в единстве эти подходы и представляют собой системы управления персоналом.

В условиях перехода к рынку сущность рационального использования кадров предприятия заключается в более полном выявлении и реализации способностей каждого работника

предприятия, в повышении его квалификационного уровня. В целях эффективного использования кадрового потенциала предприятие должно: проводить аттестацию рабочих мест, определять их необходимое количество, упразднить неэффективные рабочие места; совершенствовать организацию труда работников; проводить регулярную оценку личностного потенциала каждого работника и т.д.

Инновационные подходы к управлению персоналом существенно отличаются от ранее используемых на предприятиях. Инновационный тип современного производства по-новому формулирует проблему профессиональной успешности. Новая ситуация заставляет искать нетрадиционные социальные технологии, требует от работника умения сочетать врожденные и приобретенные качества с требованиями окружающей среды. Инновационные структуры требуют от работника особой гибкости мышления, эффективной системы восприятия, внутренней потребности в творчестве, своеобразной формы самореализации и интеграции в социальную систему. Они ориентированы в первую очередь на высококвалифицированных работников.

В современных условиях существенно изменились требования к кадровой политике, которая должна: вытекать из общей политики предприятия; быть достаточно гибкой (с одной стороны обеспечивать стабильность ожиданий работников, с другой – корректироваться в соответствии с изменением ситуации на рынке); быть экономически обоснованной; учитывать индивидуальные особенности и потребности работников.

Для оценки эффективности использования кадрового потенциала начали активно использовать такие технологии, как контроллинг персонала (современная концепция в управлении персоналом, его основная идея заключается в распространении концепции, изначально ориентированной на анализ исключительно количественных показателей на качественные в сфере управления персоналом); кадровый мониторинг; кадровый аудит (его задача - формулирование конкретных рекомендаций для вышестоящего руководства по устранению возникших несоответствий и проблем).

Таким образом, важная задача в современных условиях – мотивация руководителей думать о затратах на персонал не как о расходах, которые необходимо минимизировать, а считать персонал активами, которые следует оптимизировать. Успех инновационной деятельности современной организации во многом зависит от эффективности управления персоналом – важнейшей функциональной подсистемы предприятия и ценнейшего ресурса инновационного развития.

1. Горнаков Э.И. Управление персоналом/ Э.И. Горнаков, Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 560 с.

УДК 001.895:347.77

**ФОРМЫ И БИЗНЕС-МОДЕЛИ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ****Минько М.В.***Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Инновационные процессы в экономике и обществе тесно переплетены с функционированием института интеллектуальной собственности (ИС), создающего институциональные условия инновационного развития экономики знаний и общества в целом. Существование самого правового института ИС имеет многогранный эффект на инновационное поведение и конкуренцию на рынке, развитие технологий и формирование бизнес-моделей правообладателей и их конкурентов. Инновационное развитие, по выражению И.Шумпетера, представляющее собой «креативное разрушение» («destructive creativity»), которое постоянно создает новое, непрерывно разрушая старое, является отличительной чертой капиталистической формации. Предоставление патентной и иной формы защиты объектов ИС поощряет «гонку инноваций», поскольку создание изобретений, ноу-хау, других результатов интеллектуальной деятельности (РИД) и получение патента или иной охраны связано с жесткой и бескомпромиссной конкуренцией изобретателей и других создателей инноваций [3].

Интеллектуальная собственность в современной экономике стала основным инструментом инновационных преобразований, а, следовательно, и ключевым фактором инновационного развития. Формирующаяся экономика знаний породила новую среду конкуренции, в которой идет борьба за исключительные права на новые идеи и изобретения.

При этом особое положение занимают те виды продуктов научно-технического творчества, которые обладают правовой защитой, т. е. являются объектами интеллектуальной собственности (ОИС). Особое внимание уделяется тем результатам научных исследований и разработкам, которые могут послужить основой создания инновационной продукции или технологии. Технологии и промышленные нововведения, созданные с использованием РИД, являются основой социально-экономического благосостояния и условием обеспечения национальной безопасности государства. Вовлечение РИД в хозяйственный оборот (коммерциализация) рассматривается в настоящее время как главное направление развития экономики, создания инновационной экономики.

Краткая характеристика основных форм коммерциализации ОИС приведена в табл. 1 [2].

Обобщение существующих в литературе подходов позволяет сделать вывод, что практическая

реализация указанных форм находит выражение в трех инновационных бизнес-моделях:

– *лицензирования*, предполагающей, что компания предпочитает получать прибыль от своих идей и интеллектуальных активов, не вкладывая средства в коммерциализацию продукта (или услуги) (например, Dolby);

– *«дирижирования»*, основанной на сотрудничестве с другими компаниями, разделяющими между собой доходы и риски (например, Apple, Boeing);

– *интеграционная*, в рамках которой компания полностью контролирует инновационный процесс с целью сохранить контроль за собой и получить основную долю прибыли, принимая на себя большую часть инвестиций и соответственно рисков (например, BMW, Intel) [1].

Основными условиями применения модели *лицензирования* являются: недостаток или отсутствие ресурсов для коммерциализации; блокирование входа на рынок продукта конкурентами, например, посредством высоких технологических барьеров или доступа к сырью; использование лицензии как инструмента конкурентной борьбы на рынке инновационных продуктов (услуг) или на рынке стандартов.

Условия применения модели *дирижирования*: наличие у компании качеств безусловного технологического лидера; вступление на «незнакомую территорию» (новые рынки, районы, бренды) и необходимость разделить риски; наличие надежных партнеров с комплементарными ресурсами, в частности финансовыми.

Условиями применения интеграционной модели являются: достаточное количество ресурсов; опасение кражи имплицитных составляющих технологии, в том числе идей, не подлежащих правовой охране; нежелание брать на себя риск контрагентов; возможность контроля над затратами и сроками коммерциализации.

1. Н.В. Василенко. Коммерциализация технологии как построение инновационного бизнеса // Вестник Герценовского университета. – 2015. – № 1-2. – С.108 – 114.
2. Валдайцев, С.В. Управление инновациями и интеллектуальная собственность фирмы / С.В. Валдайцев и др.; под ред. С.В. Валдайцева: монография. – Москва: Проспект, 2014. – 416с.
3. Карцхия, А.А. Интеллектуальная собственность и инновационное развитие // А.А. Карцхия. Мониторинг правоприменения. – 2014. – №3. – С. 30-34.

Таблица 1 - Характеристика основных форм коммерциализации интеллектуальной собственности

<b>Создание инновационного продукта внутри</b>		
<b>Преимущества:</b> 1. Создание инновационной монополии 2. Право на получение всего потенциального дохода от коммерциализации 3. Снижение рисков нарушения прав собственности	<b>Недостатки:</b> 1. Высокие затраты; 2. Высокие риски 3. В большинстве случаев часть потенциальных рыночных сегментов остаются неохваченными в силу ограниченности возможностей компании	<b>Предпосылки использования:</b> 1. Наличие мощной ресурсной базы; 2. Востребованность продукции на целевом рынке 3. Корреляция технологии с основным бизнесом компании-разработчика
<b>Организация венчура</b>		
<b>Преимущества:</b> 1. Снижение зависимости основной деятельности компании от нового проекта; 2. Диверсификация деятельности	<b>Недостатки:</b> 1. Высокие риски; 2. Крупные вложения на начальных этапах коммерциализации	<b>Предпосылки использования:</b> 1. Несовместимость РИД с текущим бизнесом 2. Намерение снизить негативные последствия в случае неуспешной коммерциализации
<b>Стратегический альянс</b>		
<b>Преимущества:</b> 1. Экономия на затратах; 2. Распределение рисков неудачи 3. Оптимизация процесса создания РИД и его коммерциализации за счет возможной синергии активов участников 4. Сохранение относительной самостоятельности партнеров	<b>Недостатки:</b> 1. Необходимость длительное время поддерживать тесные отношения с партнером; 2. Транзакционные издержки	<b>Предпосылки использования:</b> 1. Сложность и комплементарность РИД 2. Невозможность покрыть все затраты самостоятельно 3. Заинтересованность во внешнем интеллектуальном капитале партнера
<b>Совместное предприятие</b>		
<b>Преимущества:</b> 1. Экономия на затратах; 2. Распределение рисков неудачи 3. Оптимизация процесса создания РИД и его коммерциализации за счет возможной синергии активов участников	<b>Недостатки:</b> 1. Потеря самостоятельности	<b>Предпосылки использования:</b> 1. Сложность рассматриваемой технологии 2. Невозможность покрыть все затраты
<b>Лицензионный договор (за исключением полной лицензии)</b>		
<b>Преимущества:</b> 1. Сохранение возможности самостоятельной коммерциализации 2. Возможность выхода на новые рынки при помощи лицензиата 3. Ограничение конкуренции (при исключительной лицензии)	<b>Недостатки:</b> 1. Потеря значительной части прибыли от коммерциализации 2. Риски нарушения прав ИС	<b>Предпосылки использования:</b> 1. Невозможность самостоятельно удовлетворить весь потенциальный спрос 2. Невозможность действовать на всех потенциальных географических рынках 3. Недостаток ресурсов для самостоятельной коммерциализации РИД
<b>Продажа патента</b>		
<b>Преимущества:</b> 1. Получение финансовых ресурсов 2. Поддержание научно-технической активности разработчика	<b>Недостатки:</b> 1. Потеря возможности участия в будущих доходах от коммерциализации РИД	<b>Предпосылки использования:</b> 1. Наличие мощной технической базы в сфере R&D 2. Отсутствие необходимости в самостоятельном использовании и применении планируемых результатов

## НОВАЯ ПАРАДИГМА ФИНАНСИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ворошина Е.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Влияние инноваций на национальную экономику одним из первых подробно исследовал в первой половине XX в. австрийский экономист Й. Шумпетер. В своих научных работах он показал, что инновации, способствуя выводу на рынок новых технологий, товаров и услуг, ведут не просто к росту экономики, а к качественному улучшению ее структуры, переводу на более высокий уровень развития.

Й. Шумпетер пришел также к выводу, что инновации обеспечивают существенное повышение эффективности производственной деятельности, позволяя значительно сократить издержки и повысить качество выпускаемой продукции и оказываемых услуг. Одновременно австрийский ученый обосновал тезис о существенной роли инноваций в стимулировании рыночной конкуренции и увеличении притока инвестиций в национальную экономику [1].

Анализ статистических данных, характеризующих состояние инновационной деятельности в Республике Беларусь, позволяет сделать следующие выводы.

Число организаций, осуществлявших инновационную деятельность, за анализируемый период 2010 – 2015 гг. увеличилось с 324 единиц в 2010 году до 342 единиц в 2015 году [2], причем изменения носят скачкообразный характер, с 2011 года наблюдается тенденция уменьшения количества организаций.

Происходит рост затрат на технологические инновации с 2793,3 млрд руб. в 2010 году до 10616,7 млрд руб. в 2015 году. Рост затрат на технологические инновации положительно характеризует состояние инновационной деятельности за анализируемый период.

Объем отгруженной продукции (работ, услуг) собственного производства в фактических отпускных ценах за вычетом налогов и сборов, исчисляемых из выручки, увеличивается с 128232,0 млрд руб. в 2010 году до 577971,7 млрд руб. в 2015 году. Удельный вес отгруженной инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции снижается с 14,5% в 2010 году до 13,1% в 2015 году. Высокий уровень удельного веса отмечен в 2012 и 2013 году – 17,8%. Снижение удельного веса отгруженной инновационной продукции за анализируемый период свидетельствует о негативных тенденциях в сфере инновационной деятельности. Наблюдается рост внутренних затрат на научные исследования и разработки с 1140,6 млрд руб. в

2010 году до 4495,4 млрд руб. в 2015 году [2], что свидетельствует о положительной тенденции в области финансирования научных исследований и разработок.

Среди факторов, препятствующих инновационной деятельности, белорусскими производителями называются экономические факторы, производственные, низкий спрос на инновационную продукцию и т. д. При этом факторы оцениваются как основные или решающие, значительные и незначительные. Например, такой фактор, как недостаток информации о рынках сбыта в 2014 году, в качестве незначительного рассматривается 64,5% опрошенных предприятий. Фактор низкого платежеспособного спроса на новые продукты в рассматриваемый период в качестве незначительного фактора рассматривается 519 опрошенными предприятиями, т. е. 43,6%, тогда как в качестве основного или решающего – 14,2%. Недостаток возможности кооперирования с другими предприятиями как фактор, препятствующий инновационной деятельности, в качестве незначительного отметило 816 из 1161 предприятий. В то же время значительной частью опрошенных предприятий – практически 48% – недостаток собственных денежных средств назван в качестве основного или значимого фактора [3].

В данной статье предлагается концепция финансирования инновационного развития предприятий Республики Беларусь, основывающаяся на новой парадигме финансирования инновационного развития, учитывающая основные цели и задачи инновационного развития национальной экономики, а также специфику национальной инновационной системы Республики Беларусь.

В соответствии с подходом неоклассической науки понятие «концепция» подразумевает фундаментальную теоретическую (концептуальную) схему (включающую в себя исходные принципы, законы, являющиеся универсальными для данной теории, основные смыслообразующие понятия и категории), и (или) идеализированную (концептуальную) схему (модель, объект) описываемой области.

Под концепцией финансирования инновационного развития предприятий Республики Беларусь подразумевается система представлений, выражающая определенный способ трактования процессов финансирования инновационного развития и презентующая ведущую идею – кооперацию участников по объединению и

использованию финансовых ресурсов, реализующих новую парадигму финансирования инновационного развития предприятий.

Предлагаемая концепция финансирования инновационного развития основана на модели кооперации тройной спирали (Triple Helix), моделях Quadruple Helix, Quintuple Helix и новых принципах построения финансовых отношений между государством, академическим сообществом, бизнесом и пользователями инноваций. Основная цель Концепции – формирование системы финансирования инновационного развития предприятий Республики Беларусь на основе кооперации участников по объединению и использованию финансовых ресурсов, создающей условия для ее экономического роста и повышения конкурентоспособности. Основой для кооперации становятся объединенные финансовые ресурсы субъектов кооперации, между которыми формируются экономические отношения по поводу создания, распределения и использования денежных фондов в процессе совместной деятельности в целях инновационного развития страны. Основная задача кооперации участников по объединению и использованию финансовых ресурсов заключается в поиске эффективных форм взаимодействия субъектов инновационной деятельности – собственников финансовых ресурсов, цель которых – инновационное развитие страны.

Финансирование инноваций в рамках предлагаемой Концепции на стадии создания нового знания осуществляется путем кооперации государства и академического сообщества, на стадии трансфера технологий путем кооперации академического сообщества и частного бизнеса, на этапе вывода на рынок результата инновационной деятельности путем кооперации академического сообщества, государства, частного бизнеса и домашних хозяйств (Triple Helix), академического сообщества, государства, частного бизнеса, домашних хозяйств и гибридных организаций (Quadruple Helix), академического сообщества, государства, частного бизнеса, домашних хозяйств и гибридных организаций в условиях естественных сред производства знаний (Quintuple Helix). Важное место в кооперации участников по объединению и использованию финансовых

ресурсов занимает согласование интересов участников как экономических субъектов. При этом кооперации участников по объединению и использованию финансовых ресурсов представляет собой не просто объединение финансовых ресурсов, а мотивированное соглашение сторон, которым движет стремление достичь собственные цели и решить собственные конкретные задачи.

Заинтересованность участников системы финансирования в кооперации обусловлена различными целями, преследуемыми сторонами.

Основными целями кооперации со стороны государства являются: обеспечение экономического роста и конкурентоспособности инновационной продукции, стимулирование инновационной активности частного бизнеса, привлечение внебюджетных источников финансирования, коммерциализация результатов инновационной деятельности.

Основными целями частного бизнеса для объединения и использования финансовых ресурсов в системе финансирования инновационного развития являются получение дополнительной прибыли и новые возможности развития бизнеса.

Концепция финансирования инновационного развития основывается на специальной методологии, которая представляет собой наложение аппарата научного исследования на конкретные исследования источников финансирования [4].

1. Ерошкин, А. М. Финансирование инновационного развития: теория и практика / Ерошкин А. М., Петров М. В., Плисецкий Д. Е. ; Федеральное гос. бюджетное учреждение науки, Ин-т Европы Российской акад. наук. – М. : Ин-т Европы РАН ; СПб. : Нестор-История, 2012. – 184 с.
2. Статистический ежегодник Республики Беларусь, 2016. – Минск: Республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь», 2016. – 519 с.
3. Сверлов, А. С. Инновационная деятельность белорусских промышленных предприятий в условиях их адаптации к рыночной динамике / А. С. Смирнов // Экономика. Управление. Инновации. – МИУ, 2017. – №1/2 (1). – С.42–46.
4. Никонова, Я.И. Новая парадигма финансирования инновационного развития России/ Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. экон. наук. – Томск, 2015. – 54.

УДК 338.9

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАДРОВ СОВМЕСТНЫХ БЕЛОРУССКО-КИТАЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Афанасенко А.В.**

*Минский государственный лингвистический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В различных странах мира продолжается практическая реализация глобального экономического проекта Китайской Народной Республики по интеграции в мировую экономику под лозунгом «Один пояс – один путь». Уже началось движение различных грузов из Китая в Европу, по пути их движения осуществляется создание соответствующей инфраструктуры в различных сферах: логистике, дорожном строительстве, информационно-правовом обеспечении и других. В Республике Беларусь, которая находится на этом пути, осуществляется комплексная реализация различных совместных экономических проектов прежде всего на базе индустриального парка «Великий камень».

В результате на протяжении ряда лет наметилась, а в нынешнем году четко обозначилась новые тенденции в подготовке и использовании кадров для этих проектов. Первая тенденция связана с подготовкой специалистов для обеспечения потребностей предприятий и организаций, участвующих в реализации проекта «Шелкового пути» не только в Китае, но и в странах-партнерах. Вторая тенденция обусловлена созданием новых совместных белорусско-китайских предприятий-резидентов индустриального парка. И если в первом случае речь идет о преимущественно международной форме занятости, то во втором создается дополнительная потребность в национальных кадрах, что создает новые возможности для белорусского рынка труда.

Для оценки масштаба и особенностей дополнительной потребности в кадрах можно проанализировать работу ряда совместных белорусско-китайских предприятий как уже работающих, так и создающихся. На протяжении ряда лет успешно работает СП «Медиа-Горизонт», которое выпускает бытовую электротехнику – СВЧ-печи, варочные панели и др. для экспорта и белорусского рынка. На предприятии работает только три гражданина КНР – директор и два заместителя, остальные работники – инженерно-технические, служащие и рабочие – граждане Республики Беларусь, которые имеют необходимую квалификацию и специальности в соответствии со штатным расписанием, но не обладают даже элементарными знаниями китайского языка. Учитывая, что три руководителя также недостаточно знают русский и белорусский, и то,

что подавляющая часть оборудования, используемого на предприятии, китайское – для обеспечения как элементарных производственных и управленческих коммуникаций в структуре аппарата управления имеется штат переводчиков, часть которых специализируется на техническом переводе. Правда, для реализации последней функции достаточно хорошего знания английского языка.

СП «Медиа-Горизонт» является действующим предприятием со сложившимся персоналом как по численности, так и по структуре, однако понятно, что для его полноценного и эффективного функционирования необходимо использовать кадры менеджеров, экономистов и инженеров, обладающих знанием китайского и английского языков, что необходимо для осуществления как профессиональных, так и коммуникационных обязанностей.

Более четко и конкретно подобная необходимость может быть определена при анализе кадровых потребностей создающихся совместных предприятий. В их числе совместное белорусско-китайское предприятие по сборке двигателей, создаваемое Минским автозаводом и китайской компанией «Вэйчай».

Это предприятие будет осуществлять сборочное производство двигателей для автомобильного и грузового транспорта, сельскохозяйственной, коммунальной и специальной техники. Предприятие будет дополнять линейку двигателей Минского моторного завода и специализироваться на экспортных поставках двигателей для стран ЕАЭС и Украины, при этом степень локализации будет составлять 50%. Планируется использовать оборудование различных производителей, в том числе китайских и белорусских.

Особый интерес представляет структура персонала этого предприятия и способ его комплектации. При этом необходимо учитывать, что доля китайской стороны будет составлять 70%, а белорусской – 30%. При планируемой численности в 200 работников руководители, а также сотрудники инженерных, технических и коммерческих подразделений будут гражданами КНР, сотрудники кадровых, финансово-экономических и других подразделений, прочие категории персонала – рабочие и служащие – будут гражданами Республики Беларусь. Естественно, что при наборе белорусского

персонала будет учитываться знание в первую очередь китайского и во вторую - английского языков, при этом для специалистов эти знания и навыки будут обязательными.

В полном объеме соответствовать таким требованиям могут две категории потенциальных соискателей: выпускники белорусских вузов со знанием китайского и английского языков и белорусы, получившие высшее образование в китайских вузах. Первых точно нет и пока быть не может, вторых практически нет. Существует небольшое количество специалистов, которые имеют базовое лингвистическое образование (Минский государственный лингвистический университет – МГЛУ) и второе высшее специальное образование, полученное в белорусских вузах, либо магистратура в этих же вузах. Представляется, что для оперативного удовлетворения уже обозначенных потребностей следует дополнить диплом переводчика как минимум дипломом магистра по инженерной или экономической специальности (это 1,5 года), либо получать второе высшее образование по этим же специальностям (а это уже 4-5 лет). Для тех, кто не имеет высшего образования самым оптимальным является получение высшего образования в вузах КНР (5-6 лет, с учетом года языковой подготовки). При этом перспективы и стратегические возможности при получении высшего образования в Китае обусловлены не только из-за связи с проектом «Шелковый путь» и степенью участия Республики Беларусь в нем, а и ориентацией образования и профессиональной деятельности на Китай – нового лидера глобальной экономики. На сегодняшний день обеспечиваться преимущественно лингвистическое образование.

Изучение китайского языка в нелингвистических вузах пока не планируется, хотя было бы логичным продолжением школьного изучения китайского языка, которое уже существует в ряде минских школ.

Возможность получения образования в КНР пока используется мало. Количество

специалистов, которые получили образование в Китае, оценивается в несколько десятков. Значительно больше специалистов прошли стажировку в китайских высших учебных заведениях, прошли обучение в магистратуре. Практически все они имеют лингвистическое образование и профессионально востребованы.

Оценивая перспективы и текущую востребованность специалистов со знанием китайского языка, можно однозначно констатировать, что в настоящее время при сохранении актуальности лингвистического образования, особую значимость приобретает высшее образование по техническим, экономическим и другим специальностям в сочетании со знанием китайского языка, получить которое сегодня можно только в Китае. Тем не менее, с учетом уже существующих потребностей совместных белорусских предприятий, можно сделать вывод, что в настоящее время востребованы и имеют профессиональные и деловые перспективы специалисты, имеющие высшее или специальное образование по любой специальности в сочетании со знанием китайского и английского языков. При этом необходимый уровень знания китайского языка реально можно обеспечить как минимум стажировкой в Китае.

2. Стредвик, Дж. Управление персоналом в малом бизнесе / Дж. Стредвик; пер. с англ. под ред. В.А. Спивака. – СПб.: Издательский дом «Нева», 2003. – 288 с.

3. Армстронг, М. Практика управления человеческими ресурсами. / М. Армстронг; пер. с англ. под ред. С.К. Мордовина. – СПб.: Питер, 2007. – 832 с.: ил. – (Серия «Классика МВА»).

4. Вязигин, А.В. Оценка персонала высшего и среднего звена / А.В. Вязигин. – М.: Вершина, 2006. – 256 с.

5. Материалы международного форума «Инновационные технологии и системы»: – Минск: ГУ «БелИСА», 2006. – 156 с.

УДК 658

## ПОТЕНЦИАЛ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИННОВАЦИОННО-ИНВЕСТИЦИОННОМ РАЗВИТИИ ЭКОНОМИКИ СТРАНЫ

Гурина Е.В., Лукьяненко А.Ю.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В Республике Беларусь уже имеется четкий курс на инновационное развитие экономики с как можно более эффективным привлечением инвестиций для этого. Связано это с тем, что более прямые и простые методы развития оказываются недоступны, поскольку в масштабах

мировой экономики в стране практически нет значительных ресурсов в большом количестве, кроме интеллектуального.

Инновационное развитие имеет ряд своих трудностей и проблем. Одна из них — стоимость.

Придумать нечто новое само по себе дорого, превратить придуманное в жизнь еще дороже, а успешно превратить новинку инновацию – еще сложнее и дороже. Другая проблема заключается в том, что стране с небольшой в мировых масштабах экономикой в целом тяжело заинтересовать крупных иностранных инвесторов. Здесь наблюдается кольцо проблем, которое тяжело разорвать: для запуска инновационного развития в полную силу необходимо создавать значимые новшества; для создания новшеств необходима очень дорогая и постоянно совершенствующаяся инфраструктура; для создания такой инфраструктуры нужны деньги, нередко в количестве, превышающем размеры бюджета страны; для получения таких денег необходимы инвестиции; для привлечения инвестиций инвестора необходимо заинтересовать; чтобы заинтересовать инвестора, нужны новшества и инновации.

Здесь можно обратить внимание на такой массово используемый продукт, как программное обеспечение. Поскольку его разработка в большей мере требует именно интеллектуальных ресурсов, и в меньшей мере – дорогой инфраструктуры, материальных затрат, денежных затрат создания инструментов для разработки, то для Республики Беларусь оно вполне может серьёзной опорой инновационно-инвестиционного развития экономики Республики Беларусь.

Включение создания, популяризации и развития программного обеспечения в процесс инновационно-инвестиционного развития экономики Республики Беларусь – потенциально выгодное решение, однако и здесь имеется ряд сложностей. Наиболее важная из них – устоявшийся рынок и очень быстрое развитие имеющихся продуктов. Если начать писать отечественное программное обеспечение с нуля, то получится дорого, слишком медленно и в условиях слишком большой конкуренции. Эту проблему позволяет решить упор на программное обеспечение со свободным или открытым исходным кодом.

Повышение интереса к свободному и открытому программному обеспечению, его использование, участие в развитии имеющихся проектов и создание на их основе новых может стимулировать национальный ИТ сектор, позволить улучшить существующие и создать собственные продукты не с нуля, а с помощью уже существующих опытных команд и даже повысить количество рабочих мест различной квалификации. При этом, специфика лицензии подобных продуктов обеспечивает независимость разработчиков и пользователей от политики других стран и их организаций. А вот сами организации и корпорации вполне готовы платить за отдельные разработки и инвестировать в

проекты со свободным исходным кодом, причем не только деньгами. Такие гиганты, как Oracle, Microsoft, Google, Apple, а также тысячи менее известных организаций вкладывают немалое количество денег в свободные и открытые программные проекты и проявляют серьёзный интерес к ним. Благодаря такому союзу родились многие известные людям продукты – Android, Google Chrome, форматы офисных файлов docx, xlsx, pptx и многое другое.

Таким образом системное и широкое стимулирование и популяризация использования программного обеспечения со свободным или открытым исходным кодом, там где это целесообразно, для Республики Беларусь будет инновацией, поскольку позволит воспитать такого белорусского пользователя, который не зависит от зарубежных организаций и умеет выбирать. В будущем это повлечет за собой процесс импортозамещения в данной сфере. При этом дополнительно уменьшается использование пиратского программного обеспечения. Подобный опыт уже существует в таких странах, как Германия, Франция, США, Италия и некоторых других. Коммерческие компании все чаще используют свободное программное обеспечение в своих бизнес-процессах. На открытом ПО производители добиваются отличной вычислительной мощности и у них появляется возможность просматривать исходный код библиотек, находить в них узкие места и реализовывать свою продукцию, оптимизировав данные издержки. На рынке труда растет спрос как на специалистов, так и на квалифицированных пользователей открытых технологий. Наибольший интерес свободные программы представляют в настоящее время для органов государственной и муниципальной власти, бюджетных учреждений. Правительства различных стран на национальном, государственном, федеральном и международном уровнях изучают пользу свободного программного обеспечения по целому ряду причин. Некоторые из них сугубо технологические – руководящие органы считают главным преимуществом данного подхода наличие открытого исходного кода. Другие – финансовые: снизить расходы на аппаратное и программное обеспечение. В конечном счете, целью данных действий является создание единой базы открытых проектов, которая поможет обеспечить процесс обмена и повторного использования уже разработанного кода.

Вместо создания приложений с нуля государственные учреждения смогут воспользоваться готовыми решениями, заимствовать для своих разработок части уже созданных продуктов или организовать совместную разработку с другими организациями. Создание собственных программ не с нуля вместе с опытными группами способно

кардинально изменить роль программного обеспечения в экономике Республики Беларусь, скорость его разработки и массовость его распространения. При этом возрастет также внимание и желание помогать и инвестировать в данную сферу у серьезных международных организаций, небольших организаций и даже отдельных разработчиков, повышается имидж страны. А в страну с высоким имиджем в информационной сфере начинают приходить инноваторы и инвесторы не только в сфере программного обеспечения, но и в совершенно других.

Таким образом можно сделать вывод, что программное обеспечение с открытым или свободным исходным кодом при правильном подходе способно стать тем инструментом, который может кардинально повлиять на инновационное развитие экономики Республики Беларусь и значительно повысить желание

инвесторов вкладывать в нее деньги и усилия. Это может стать настоящим поворотом по сравнению с тем, куда мы движемся сейчас, а также тем самым опытом, который будут изучать и перенимать у Республики Беларусь.

1. TheDocumentFoundation – Проекты / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.documentliberation.org/projects/>.
2. Журнал научных публикаций Международного опыта перехода на свободное программное обеспечение в государственных учреждениях [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.jurnal.org/articles/2014/inf1.html> – Дата доступа: 02.09.2017
3. ВебАрхив – Миграция на свободное ПО [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.webcitation.org/66do9j8oC> – Дата доступа: 03.09.2017.

УДК 658

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПЛАНИРОВАНИИ

Мелюшин П.В., Лукьяненко А.Ю.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Искусственные нейронные сети (далее просто: нейронные сети или нейросети) входят в комплекс интеллектуальных информационных систем (ИИС). Задача этих систем – осуществление поддержки деятельности и поиска информации в режиме продвинутого диалога на естественном языке. Нейросети выделяются в этом комплексе тем, что они не программируются в привычном смысле этого слова, а представляют собой сложную модель, которая способна обучаться. Эта возможность – одно из главных преимуществ нейронных сетей, а само обучение технически заключается в нахождении коэффициентов связей между блоками данных (нейронами). Несмотря на то что при построении таких сетей обычно делается ряд допущений и значительных упрощений, отличающих их от биологических аналогов, искусственные нейронные сети демонстрируют удивительное число свойств, присущих мозгу, – это обучение на основе опыта, обобщение, извлечение существенных данных из избыточной информации. В процессе работы нейронная сеть способна находить многоуровневые зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Обученная сеть может быть устойчивой к некоторым отклонениям входных данных.

Определенная близость нейросетей к принципам работы мозга позволяет использовать

их там, где обычным программам самостоятельно справиться с задачей не под силу. Одними из таких направлений являются планирование и прогнозирование. Несомненно, существуют самые сложные программы, базы данных, динамические математические модели с графическими интерфейсами. Но все они имеют серьезные недостатки: они неспособны отреагировать на ту ситуацию, которая в них не заложена; они опираются на те принципы, которые заложены в них экспертами и программистами; программу нередко приходится серьезно перестраивать при изменении рабочих условий.

Существует и множество других проблем у «обычных» программ по сравнению с нейросетями, что лишь усиливает сравнительный потенциал последних. Это также подтверждается тем, что именно прогнозирование на основе нейросетей наиболее полно реализовано в сфере финансов и в экономике. Ниже перечислены области сфер планирования и прогнозирования, в которых эффективность применения нейронных сетей уже доказана на практике:

Для финансовых операций: прогнозирование поведения клиента; прогнозирование и оценка риска предстоящей сделки; прогнозирование возможных мошеннических действий; прогнозирование остатков средств на корреспондентских счетах банка;

прогнозирование движения наличности, объемов оборотных средств; прогнозирование экономических параметров и фондовых индексов.

Для планирования работы предприятия: прогнозирование объемов продаж; прогнозирование загрузки производственных мощностей; прогнозирование спроса на новую продукцию.

Прогнозирование - это предсказание будущих событий. Целью прогнозирования является уменьшение риска при принятии решений. Прогноз обычно получается ошибочным, но ошибка зависит от используемой прогнозирующей системы. Предоставляя прогноз больше ресурсов, можно увеличить точность прогноза и уменьшить убытки, связанные с неопределенностью при принятии решений. Процессы планирования и прогнозирования тесно связаны с такими явлениями, как: неполнота полезных данных; наличие «шума» (бесполезных данных); возможная ошибка человека; очень сложные и не видимые человеку взаимосвязи между отдельными факторами; необходимость использовать опыт, извлеченный из операций планирования в прошлом.

При определении того, что нужно прогнозировать, обычно указываются переменные, которые анализируются и предсказываются. Здесь очень важен требуемый уровень детализации. Система планирования может требовать прогноз требуемого количества продукции в единицах по каждому виду. С другой стороны, менеджер по продаже может потребовать только прогноз общей суммы продажи продукта в долларах. В первом случае прогнозирование построено на единичном базисе, во втором - на обобщенном базисе. Пока требуется результирующая информация первого или второго типа нельзя однозначно выбрать анализируемые переменные.

Второй важный этап при построении прогнозирующей системы - это определение следующих трех параметров: периода прогнозирования, горизонта прогнозирования и интервала прогнозирования. Выбор периода и горизонта прогнозирования обычно диктуется условиями принятия решений в области для которой производится прогноз. Для того, чтобы прогнозирование имело смысл, горизонт прогнозирования должен быть не меньше, чем время, необходимое для реализации решения принятого на основе прогноза. Таким образом, прогнозирование очень сильно зависит от природы принимаемого решения. В некоторых случаях, время, требуемое на реализацию решения не определено. Существует методы работы в условиях подобной неопределенности,

но они повышают вариацию ошибки прогнозирования.

Третьим аспектом прогнозирования является требуемая форма прогноза. Обычно при прогнозировании проводится оценка ожидаемого значения переменной, плюс оценка вариации ошибки прогнозирования или промежутка, на котором сохраняется вероятность содержания реальных будущих значений переменной. Этот промежуток называется предсказуемым интервалом.

Далее описаны примеры задачи с помощью чего их можно решить - обычный ПК или нейронные сети. Простые и средние по сложности, принцип решения которых известен: легкие уравнения; распечатка документа; запуск программы. Подобные задачи решаются с помощью обычного ПК. Мало- среднесложные задачи с частичным знанием решения: прогнозирование ситуации; нахождение погрешности; приблизительные ответ уравнения. Такие задачи решаются при помощи статистики. Высокая сложность задачи с неизвестным решением: сложное прогнозирование; распознавание речи; распознавание образов. Данные задачи решаются только при помощи нейронных сетей (или людей).

Методы нейронных сетей могут использоваться независимо или же служить прекрасным дополнением к традиционным методам статистического анализа при планировании и прогнозировании. Нейросетевой подход одинаково пригоден для линейных и сложных нелинейных зависимостей, особенно же эффективен в разведочном анализе данных, когда ставится цель выяснить, имеются ли зависимости между переменными. При этом данные могут быть неполными, противоречивыми и даже заведомо искаженными. Если между входными и выходными данными существует какая-то связь, даже не обнаруживаемая традиционными корреляционными методами, то нейронная сеть способна автоматически настроиться на нее с заданной степенью точности, что очень помогает при составлении прогноза.

Преимущества нейросети при прогнозировании и планировании: отсекание шума входных данных - после обучения нейросеть способна решать, какие данные являются мусором, искажающим результаты прогноза; адаптация к изменениям - возможность адаптации нейросетей к изменениям позволяет им работать даже в критической ситуации; самообучение - самое важное свойство нейросетей; отказоустойчивость - при не критическом повреждении системы выдаваемые ей ответы логичны и правильны; быстрота работы - составление прогноза и планирование может идти намного быстрее и при

этом точнее, чем при использовании обычных алгоритмов, что очень ценно в критических ситуациях.

Казалось бы, нейросети – это идеальное решение всех существующих проблем, но это совсем не так, поскольку недостатки у них тоже есть. Эта система не есть панацея – это лишь отличный дополнительный функционал для решения тех или иных задач. Основные проблемы: приблизительный ответ – нейронные сети не способны выдавать точный ответ. Они могут помочь составить более точный прогноз, нежели человек сделает это сам, но полностью уйти от неопределенности не могут даже нейронные сети; многошаговые решения – нейросеть не способна шаг за шагом решить задачу в привычном понимании этого процесса, поскольку это система с распределенной и параллельной работой с данными; вычислительные процессы – нейросети не могут полноценно решать вычислительные задачи из-за двух вышеописанных недостатков.

В общем и целом – потенциал нейронных сетей в планировании и прогнозировании огромен, поскольку сильные стороны нейросетей как раз и проявляются в данных процессах. При этом слабые стороны (например, приблизительные ответы) проявляются слабее в связи с самой природой процессов планирования и прогнозирования. Порой даже «слабые стороны» нейросетей работают лучше, чем те инструменты, которые используются сейчас.

Нейросети умеют практически все, но их работа пока напоминает черный ящик. Даже

команда, которая создаст какую-нибудь конкретную нейросеть для решения конкретной задачи, не сможет ответить как именно внутри этой нейросети протекают процессы. Всё, что они смогут – это обучить нейросеть. При этом при работе с нейронными сетями самым сложным и трудоемким процессом является именно обучение ИНС решать ту или иную задачу. Необходимо учитывать каждую деталь, каждую мелочь, поскольку даже незначительная ошибка или отсутствие минимальной части данных приведет к неправильной работе всей нейронной сети в целом.

В конечном счете, можно сделать вывод, что нейросети – это очень мощный и по-своему уникальный инструмент в прогнозировании и планировании. Однако он не является панацеей, и следует четко понимать, где его можно использовать, а где – нецелесообразно.

1. Нейронные сети: на пороге будущего / [КомпьютерПресс / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://compress.ru/article.aspx?id=9663> – Дата доступа: 05.09.2017.
2. Искусственные нейронные сети (ИНС) – что такое нейросети, как они работают [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://goo.gl/JhN31P> – Дата доступа: 03.09.2017.
3. Нейронные сети: варианты использования [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://md-it.ru/articles/html/article19.html> – Дата доступа: 04.09.2017.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

<i>Распопов В.Я.</i> ГИРОСТАБИЛИЗАТОРЫ НА ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПАХ .....	5
<i>Савченко А.Л., Минченя В.Т., Минченя Н.Т.</i> АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГОЭЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРТЕРИАЛЬНОЙ СТЕНКИ НА ФАНТОМАХ .....	6
<i>Гуревич В. Л.</i> СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТРОЛОГИИ .....	8

### Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

<i>Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И.</i> СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СТОЧНЫХ ВОД НА ФОНЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРИРОДНЫХ ТРЕНДОВ .....	11
<i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> МЕТОД МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ ЖИДКОСТНЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ .....	13
<i>Малютин Д.М.</i> ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОРСКИХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ С САМОНАСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА .....	15
<i>Пономарева Н.В.</i> КОМПЬЮТЕРНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА МУЗЫКАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ .....	16
<i>Пономарева О.В.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСКРЕТНЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ .....	18
<i>Цокота М.В., Тымчик Г.С., Терещенко Н.Ф., Чухраев Н.В.</i> ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕВОЖНО-ДЕПРЕССИВНЫХ РАССТОЙСТВ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ .....	20
<i>Пономарев В.А., Пономарева О.В., Пономарев А.В., Пономарева Н.В.</i> ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ .....	22
<i>Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н., Крекотень О.В.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБРАТНОРАССЕЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	23
<i>Бобрикович А.А., Гусев О.К., Воробей Р.И.</i> ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ АППАРАТУРЫ .....	25
<i>Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Асадчая М.В.</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛН РЭЛЕЯ И СТОУНЛИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ .....	26
<i>Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Кравцевич А.В., Жарин А.Л.</i> АНАЛИЗ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭДС НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ПЭВД .....	28
<i>Бусько В.Н., Фисюнов А.Д., Рубникович С.П.</i> МЕТОДИКА И ОСОБЕННОСТИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	30
<i>Гладкий А.В., Жарин А.Л.</i> СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ПЛАТФОРМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ .....	32
<i>Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.</i> ТОЛЩИНОМЕТРИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДВУХСЛОЙНОГО НИКЕЛЬ-ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА НЕМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ МАГНИТООТРЫВНЫМ МЕТОДОМ .....	34

<b>Дудчик Ю.И., Серебрянников Д.А., Еришов П.А., Климова Н.Б., Снигирев А.А. СФЕРИЧЕСКИЕ И ХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ</b> .....	36
<b>Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л. АЛГОРИТМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОТКАЗАХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ</b> .....	37
<b>Лобко А.С., Мисевич О.В., Холмецкий А.Л. ГАММА-РЕЗОНАНСНЫЙ КОНЦЕНТРАТОМЕР ДИОКСИДА ОЛОВА</b> .....	39
<b>Колтунович Т., Костина Г.А., Пантелеев К.В., Самарина А.В., Свистун А.И., Тявловский К.Л. ПРОГРАММНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДА</b> .....	41
<b>Нуген Д.Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОДНОЗНАЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ РАЗНОСТИ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ДВУХКАНАЛЬНОМ ПАССИВНОМ ГИДРОЛОКАТОРЕ НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ</b> .....	43
<b>Савченко А.Л., Минченя Н.Т., Журавский А.А., Берхин Е.В. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОР АВТОМОБИЛЬНЫХ ВЕСОВ</b> .....	45
<b>Усольцев В.П., Уразманова О.И. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b> .....	46
<b>Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Париков А.В., Сушко В. А. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ</b> .....	48
<b>Матвиенко А.Н., Терещенко Н.Ф., Матвиенко С.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО РАЗОГРЕВА ТЕРМИСТОРА</b> .....	50
<b>Терещенко Н.Ф., Цапенко В.В., Чухраев Н.В. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ</b> .....	52
<b>Голубев А.А., Невдах В.В. ГАЗОДИНАМИКА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b> .....	53
<b>Герасимович В.А., Невдах В.В. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ В ПОМЕЩЕНИИ</b> .....	56
<b>Черневич О.В., Пастушенко Е.В., Тарасова Н.С. РАЗРАБОТКА ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ ПО ЕВРОПЕЙСКИМ НОРМАМ</b> .....	59
<b>Лисенков Б.Н., Грицев Н.В. КОММУТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ</b> .....	60
<b>Борисевич А. Е., Лобко А.С. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОРБИЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ЭФФЕКТИВНЫХ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОД ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ</b> .....	62
<b>Медведев Н.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ПЕРИМЕТРОМ</b> .....	64
<b>Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н. ДАТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВЫХ ВОЛНОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ЖК ЗАПОЛНЕНИЕМ</b> .....	66
<b>Гавриленко В.В., Зайцева Е.Г. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМА НА ЧЕЛОВЕКА С УЧЕТОМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ</b> .....	68
<b>Невдах В.В., Антошин А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАССОВОЙ СКОРОСТИ СТОРАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗВИТИИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ</b> .....	70
<b>Антошин А.А., Волков С.А., Олефир Г.И., Голубев А.А. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ И СМЕЖНЫХ С НИМ ПРОСТРАНСТВАХ</b> .....	71

<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский К.Л., Шадуурская Л.И., Русакевич Д.А.</i> <b>ГЕТТЕРИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ</b> .....	73
<i>Petrik V., Protasov A., Seriy K., Lysenko I.</i> <b>USING WIRELESS DATA TRANSMISSION IN EDDY CURRENT NONDESTRUCTIVE TESTING</b> .....	74
<i>Оксенчук И.Д., Кривицкий П.Г., Францкевич А.В.</i> <b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКА С УПРУГОПОДВЕШЕННОЙ ПОДВИЖНОЙ МАССОЙ</b> .....	76
<i>Ковыньёв Н.В.</i> <b>УГРОЗЫ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ RFID И NFC МЕТОК</b> .....	78
<i>Петкевич М.Н., Титович Е.В., Герцик О.А., Потепалов П.О., Киселев М.Г.</i> <b>ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ TRUEBEAM STX В ГУ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОНКОЛОГИИ И МЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЛОГИИ ИМ. Н.Н. АЛЕКСАНДРОВА»</b> .....	79
<i>Тявловский А.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Мухуров Н.И., Шаронов Г.В.</i> <b>КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОТРАЖАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСШЕГО КЛАССА ЧИСТОТЫ МЕТОДАМИ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ</b> .....	81
<i>Жарин А.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Пилипенко В.А., Петлицкий А.Н.</i> <b>РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА МОДУЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭДС В КОНСТРУКЦИИ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН</b> .....	83
<i>Зиновенко Е.С., Титович Е.В., Петкевич М.Н., Герцик О.А., Киселев М.Г.</i> <b>ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕДУР КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА «ФТОРДЕЗОКСИГЛЮКОЗА»</b> .....	85
<i>Козловский Д.И., Титович Е.В., Тарутин И.Г., Петкевич М.Н., Герцик О.А., Киселев М.Г.</i> <b>ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ГАММА-ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ И БРАХИТЕРАПИИ В ГУ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОНКОЛОГИИ И МЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЛОГИИ ИМ. Н.Н. АЛЕКСАНДРОВА»</b> .....	86
<i>Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Жарин А.Л.</i> <b>УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ДАТАЛОГГЕР-САМОПИСЕЦ</b> .....	87
<i>Габец В.Л., Зубеня А.А.</i> <b>КОМПЛЕКС АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭКСТРАКТА САХАРНОЙ СВЕКЛЫ</b> .....	88
<i>Мисюкевич Н.С.</i> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ПОДОБИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ</b> .....	90
<i>Воробей Р.И., Пантелеев К.В., Тявловский К.Л., Адамович А.Р., Дробуш Ю.И.</i> <b>МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ОХРАННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ</b> .....	91
<i>Куц Ю.В., Лысенко Ю.Ю., Редька М.А.</i> <b>СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИФРАКЦИОННО-ВРЕМЕННОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ</b> .....	93
<i>Лебедев А.Н., Степанов Б.А., Нестеров М.С., Онуфриев С.В.</i> <b>MOTION IMPRINT КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ СТРОГОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ</b> .....	94
<i>Максимов Р.Л., Рафиков А.Г.</i> <b>ЗАЩИТА КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОТ АТАК JASCROTTING</b> .....	96
<i>Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С.</i> <b>ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ</b> .....	98
<i>Баранов В.В., Батурля И.В., Кузьмич А.И., Петрович В.А., Серенков В.Ю., Шахлевич Г.М.</i> <b>ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ</b> .....	100

<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Жуковский П., Опеляк М., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Буйневич М.В.</i> <b>ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФОТОПРИЕМНИКОМ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА</b> .....	101
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Жуковский П., Зданович С.В., Колтунович Т., Опеляк М., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> <b>ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПАРАТОР НА БАЗЕ ДВУХБАРЬЕРНОГО ФОТОПРИЕМНИКА С ДЛИННОЙ БАЗОЙ</b> .....	103
<i>Иванов В.И., Иванов Н.И., Лазарчик А.Н.</i> <b>КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ</b> .....	105
<i>Сопряков В.И., Чижонок М.В.</i> <b>ЭЛЕКТРОФЛУКТУАЦИОННАЯ ДИГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ</b> .....	107
<i>Гришин С.А., Селянтьев В.А., Климков Я.А., Климкова Д.А.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ</b> .....	108
<i>Гришин С.А., Селянтьев В.А., Недвецкий Н.С., Волкович М.Н., Климентовский В.В., Колдашов С.В., Александрин С.Ю., Батищев А.Г., Гальпер А.М.</i> <b>ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОКОВ МНОГОСЛОЙНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ ДЕТЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ</b> .....	110
<i>Гришин С.А., Бунчук А.А., Климентовский В.В., Буй А.Н., Ягодников Д.А., Лапицкий В.И.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗГАРА ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ</b> .....	112
<b>Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ</b>	
<i>Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.</i> <b>СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ</b> .....	115
<i>Скурту И.Т., Ерошенко А.С., Брановицкий И.И.</i> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	117
<i>Рубаник В.В., Джежора А.А., Буркин А.Н., Борозна В.Д.</i> <b>КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОДОШВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	118
<i>Ананьин В.Н., Мирончик А.М., Мохнач М.В., Скакун С.С.</i> <b>МЕЖДУНАРОДНЫЕ СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ В ОБЛАСТИ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	120
<i>Петров С.Н., Горошко С.М., Прудник А.М.</i> <b>ИМПЕДАНСНАЯ ТРУБА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И ПОТЕРЬ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЗВУКА</b> .....	121
<i>Серенков П.С., Мовламов В.Р., Письменский П.И.</i> <b>РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК КОНТРОЛЯ</b> .....	122
<i>Комар Д.И., Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кутень С.А.</i> <b>МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЗИМЕТРИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 10 МЭВ</b> .....	124
<i>Волынец А.С.</i> <b>ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ И ПЕРЕДАЧЕ ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НАЦИОНАЛЬНЫМ ЭТАЛОНОМ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НЭ РБ 26-15</b> .....	125
<i>Козак О.Г.</i> <b>СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БИОПОТЕНЦИАЛОВ СЕРДЦА</b> .....	127
<i>Серенков П.С., Войнич К.Э., Бужан И.А.</i> <b>ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА ПРОЕКТА ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ФОКУС-ГРУППЫ</b> .....	132

<i>Стрельчук Е.Н.</i> <b>МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b> .....	134
<i>Разумный А.И., Гуревич В.Л.</i> <b>МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА В КОНТЕКСТЕ ПАРАДИГМЫ «INDUSTRIE 4.0»</b> .....	136
<i>Подригало М.А., Коробко А.И., Исакова Е.В.</i> <b>НОВЫЙ СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ СОВПАДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	138
<i>Бринкевич Д.И., Лукашевич М.Г., Просолович В.С., Харченко А.А., Янковский Ю.Н., Черный В.В.</i> <b>МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ/НУКЛОН</b> .....	140
<i>Заика В.С., Волкеништейн С.С., Хмыль А.А.</i> <b>АНАЛИЗ И ДОРАБОТКА ПРОЕКТА СТЬ/ОР «ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ТИПА «ТУМБЛЕР». ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ»</b> .....	142
<i>Пиунов В.Д., Пряхин А.Е.</i> <b>ПРИСТАВКА К ЯМР ТЕСЛАМЕТРУ Ш1-1 НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ ВЫВОДА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В ЕДИНИЦАХ ТЕСЛА</b> .....	144
<i>Иванов В.В., Яковичин А.С., Захаров О.В.</i> <b>К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ ПОГРЕШНОСТИ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН</b> .....	145
<i>Валенда А.Г., Волкодатов А.А., Прусаков А.К., Ярмолович М.А.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ</b> .....	147
<i>Манкевич О.Д., Ровнейко И.В.</i> <b>СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭТАЛОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ</b> .....	149
<i>Сентемова Д.В.</i> <b>АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА ПОВЕРИТЕЛЯ ПРИ ПОВЕРКЕ МНОГОЗНАЧНЫХ МЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ</b> .....	152
<i>Силич В.В.</i> <b>АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОВЕРКИ ЦИФРОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ</b> .....	154
<i>Клевитская Е.Д., Демидов И.В., Савкова Е.Н.</i> <b>ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОТБОРА ПРОБ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ИЗМЕРЕНИЯХ</b> .....	156
<i>Скалецкая И.Е.</i> <b>МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ</b> .....	158
<i>Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С., Солодуха В.А., Петлицкий А.Н., Соловьев Я.А., Керенцев А.Ф.</i> <b>СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ T3STER И ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ</b> .....	160
<i>Купреева Л.В., Солодуха Ю.А.</i> <b>КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ И МАРКИРОВКЕ ЕЕ ЗНАКОМ СЕ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b> .....	162
<i>Лысенко В.Г., Борис В.С.</i> <b>ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГРАФИЧЕСКИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ</b> .....	164
<i>Saukova Y., Sutkovski M.</i> <b>THE UNCERTAINTY OF ANTHROPOMETRIC PARAMETERS MEASUREMENTS IN DIGITAL BIOMETRIC SYSTEMS</b> .....	166
<i>Saukova Y., He E.</i> <b>THE TRACEABILITY OF LOCATION AS A KEY ASPECT OF PRODUCTS CONFIRMATION</b> .....	168
<i>Савкова Е. Н., Миргород Ю. С., Матюш И.И.</i> <b>МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ</b> .....	169
<i>Серенков П.С., Бояровская К.И.</i> <b>КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА СОЗДАНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И УЛУЧШЕНИЯ СМК ОРГАНИЗАЦИИ</b> .....	171

<b>Серенков П.С., Лесин А.С. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	173
<b>Серенков П.С., Сацукевич А.А., Иванова Н.Н. КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ</b> .....	175
<b>Серенков П.С., Романчук В.М., Сацукевич А.А., Басинюк В.Л. ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В ПЛАНИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ</b> .....	177
<b>Соколовский С.С., Малиновская С.Л. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ</b> .....	179
<b>Спесивцева Ю.Б., Боровисюк Т.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СМК ОАО «2566 ЗРРЭВ»</b> .....	181
<b>Стадник В.В., Подорожняк А.А., Коваль А.А. НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ</b> .....	183
<b>Стадник В.В., Скорин Ю.И. СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СРЕДСТВАМИ ТЕХНОЛОГИИ WINDOWS PRESENTATION FOUNDATION</b> .....	185
<b>Хорлоогийн А.С., Казанская В.Д., Фомиченко Е.А. ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ ФИЗКУЛЬТУРНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЙ УСЛУГИ</b> .....	187
<b>Цитович Б.В., Соколовский С.С., Петрусенко П.А. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ</b> .....	189
<b>Павлов К.А., Бояровская К.С. НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ГУ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ЦЕНТР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ, КОНТРОЛЮ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ»</b> .....	191
<b>Лебедев А.Н., Афоненко А.А. СТАНДАРТИЗАЦИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: ОСОБЕННОСТИ И НЕУЧТЕННЫЕ ФАКТОРЫ</b> .....	193
<b>Длугунович В.А., Никоненко С.В., Беляев Ю.В., Кучинский П.В., Попков А.П., Цикман И.М., Скумс Д.В., Тарасова О.Б. СОЗДАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ БЕЛАРУСИ ДЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ</b> .....	194
<b>Матюш И.И., Спесивцева Ю.Б. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ</b> .....	196
 <b>Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>	
<b>Степаненко Д.А., Емельянова А.С., Плескач М.А., Солодка Н.В. РАСЧЕТ КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПЕРЕДАТОЧНЫХ МАТРИЦ</b> .....	199
<b>Сандомирский С.Г. НОВЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА СТАЛЕЙ В ПРИБОРАХ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ</b> .....	201
<b>Данько К.А., Долматов А.И. РАСХОДНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ДЕТАЛИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ</b> .....	202
<b>Францкевич Н.В., Францкевич А.В., Шеденков С.И. ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ <math>\text{Si}_{6-x}\text{Ni}_x\text{Si}</math></b> .....	204

<i>Францкевич Н.В., Францкевич А.В., Шеденков С.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ВОДОРОДА ИЛИ ГЕЛИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ.....	206
<i>Бойправ О.В., Богуш Н.В., Лыньков Л.М.</i> КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ.....	208
<i>Абудади Х.Д.А., Прудник А.М., Лыньков Л.М.</i> МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИГЛОПРОБИВНОГО МАТЕРИАЛА.....	210
<i>Киселев М.Г., Богдан П.С., Русанов А.П.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ БОРОВ ПУТЕМ ЕЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	212
<i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Русанов А.П.</i> ТЕХНОЛОГИЯ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВИНТОВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ.....	213
<i>Киселев М.Г., Богдан П.С., Ямная Д.А., Давыдова К.А.</i> МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПИЛИВАЕМОГО МАТЕРИАЛА С НАПЛЫВАМИ МЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННЫМИ НА ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА, В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ.....	215
<i>Киселев М.Г., Богдан П.С., Семенович В.П.</i> МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗУБНОГО БОРА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЕГО ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	217
<i>Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Земляков А.С., Пронина М.И., Лушакова М.С.</i> СВЧ-ПЛАЗМОТРОН РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЧ-ЭНЕРГИИ В ОБЪЕМЕ ПЛАЗМЕННОЙ КАМЕРЫ.....	219
<i>Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСАДКУ И КОРОБЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТА.....	221
<i>Кутепов А.Ю., Крень А.П.</i> ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ НА ИХ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ.....	223
<i>Вонсевич К.П., Безуглый М.А.</i> МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ПАЛЬЦЕВ РУК ДЛЯ ПРОТЕЗНОГО ПРИМЕНЕНИЯ.....	225
<i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Лапутина Д.Г.</i> ПАТОГИСТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ УСТАНОВКЕ ВИНТОВОГО СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ СПОСОБОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	227
<i>Петухов И.Б., Кипарин И.Н.</i> СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА МИКРОСХЕМЕ DDS AD9833 ДЛЯ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ.....	229
<i>Рыжневич А.А., Балыкин И.В., Мащенко А.Г., Железнякова Т.А.</i> ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПОЗИЦИОНЕР.....	231
<i>Савич В.В.</i> УНИКАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ПРИБОРОВ.....	232
<i>Бринкевич Д.И., Оджаяев В.Б., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Черный В.В.</i> ВЛИЯНИЕ ВИДА ОСНОВНОЙ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИФФУЗИИ ИТТЕРБИЯ.....	236

<i>Рыжневич А.А., Митьковец А.И., Смирнов А.Г., Мащенко А.Г., Железнякова Т.А., Гореленко А.Я., Захарич М.П.</i> <b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КРАСОК</b> .....	238
<i>Шепелевич В.Г., Гусакова С.В., Гусакова О.В.</i> <b>СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВОВ (Sn<sub>4</sub>In)<sub>100-x</sub> Bi<sub>x</sub>, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ</b> .....	240
<i>Савченко А.Л., Латушкина С.Д., Минченя В.Т.</i> <b>ПОКРЫТИЯ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИТИНОЛА</b> .....	242
<i>Шепелевич В.Г., Метто Е.С., Гусакова С.В., Гусакова О.В.</i> <b>СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРО ЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА Sn-14 АТ. % In – 6,5 АТ. % Zn</b> .....	244
<i>Гусакова О.В., Шепелевич В.Г.</i> <b>ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ИНДИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ Sn-Zn-Bi-In</b> .....	246
<i>Адашкевич С.В., Бакаев А.Г., Маркевич М.И., Стельмах В.Ф., Чапланов А.М., Щербакова Е.Н.</i> <b>НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПЕНОПЛАСТА МАРКИ «АКРИМИД»</b> .....	247
<i>Адашкевич С.В., Бакаев А.Г., Маркевич М.И., Стельмах В.Ф., Чапланов А.М., Щербакова Е.Н.</i> <b>МАГНИТОРЕЗОНАНСНАЯ ДИАГНОСТИКА ПОРОШКА Y-Ba-Cu-O</b> .....	249
<i>Жевняк О.Г., Жевняк Я.О.</i> <b>О КВАНТОВАНИИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КАНАЛЕ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ</b> .....	251
<i>Смирнов А.Г., Рыжневич А.А., Агайков А.В.</i> <b>ДЕЙСТВУЮЩИЙ МАКЕТ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ</b> .....	253
<i>Кукареко В.А., Ситник А.А., Соломахо В.Л., Шапарь В.А.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИКСАТОРОВ ДИСТАЛЬНОГО ОТДЕЛА БОЛЬШЕБЕРЦОВОЙ КОСТИ</b> .....	255
<i>Щетникович К.Г., Кучер А.О.</i> <b>ВЫБОР НАГРУЗКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ШАРИКОВ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ И КОЛЬЦОМ</b> .....	257
<i>Счастный А.С., Осипов А.А., Бурак В.А.</i> <b>ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ КОЭРЦИТИМЕТРОМ КИПФ-1</b> .....	258
<i>Волошко О.В., Выслоух С.П.</i> <b>МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	260
<i>Гундина М.А.</i> <b>ПРИМЕНЕНИЕ РЯДОВ ФУРЬЕ В ЗАДАЧЕ О РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИНЫ С ТРЕЩИНОЙ</b> .....	262
<i>Нестеренко А.О., Выслоух С.П.</i> <b>ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b> .....	263
<i>Бокуть Л.В., Деев Н.А.</i> <b>ФОРМИРОВАНИЕ СКРЕМБЛИРОВАННОГО ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА ДЛЯ МАСКИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ</b> .....	265
<i>Князев М.А., Русакевич Д.А.</i> <b>ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ СОЛИТОНА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА</b> .....	267
<i>Князев М.А., Блинкова Н.Г.</i> <b>УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПОПРАВКИ ВТОРОГО ПОРЯДКА К ПЛОТНОСТИ КОНДЕНСАТА БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНА</b> .....	269
<i>Романчук В.М.</i> <b>ИЗМЕРЕНИЕ НЕФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН</b> .....	271
<i>Князев М.А.</i> <b>РЕШЕНИЯ ТИПА WOBBLING KINK И OSCILLATING KINK В ТЕОРИИ <math>\phi^4</math></b> .....	272
<i>Крупенкова Т.Г., Липницкий В.А.</i> <b>КРИПТОГРАФИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ КРИПТОСИСТЕМЫ РАБИНА</b> .....	274

<i>Реутская О.Г.</i> <b>ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА НА ГАЗОВУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДВУХСЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ</b> .....	275
<i>Савицкий А.А., Гайдук Ю.С., Реутская О.Г., Ломоносов В.А.</i> <b>ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (Ag, Pd) НА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДА ВОЛЬФРАМА WO<sub>3</sub> И КОМПОЗИЦИИ WO<sub>3</sub>-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b> .....	277
<i>Киселев М.Г., Ямная Д.А.</i> <b>ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗАГОТОВКИ</b> .....	279
<i>Луговой В.П.</i> <b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ КАЧЕСТВ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ</b> .....	281
<i>Киселев М.Г., Ямная Д.А.</i> <b>ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОДАЧЕЙ</b> .....	282
<i>Волкеништейн С.С., Солодуха В.А., Соловьев Я.А., Керенцев А.Ф., Хмыль А.А.</i> <b>ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ</b> .....	284
<i>Телеш Е.В.</i> <b>ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ TiN РЕАКТИВНЫМ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ</b> .....	286
<i>Телеш Е.В., Гуревич О.В., Юшкевич С.А.</i> <b>ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiO<sub>2</sub>F РЕАКТИВНЫМ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КВАРЦЕВОЙ МИШЕНИ</b> .....	287
<i>Дятлова Е.М., Сергиевич О.А., Шамкалович В.И.</i> <b>ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....	289
<i>Ковынёв Н.В.</i> <b>ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДНК-МЕТОК</b> .....	291
<i>Скопцов А.М., Врабий Э.М., Баранов В.В., Шахлевич Г.М.</i> <b>ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН</b> .....	293
<i>Щетникович К.Г., Еромин Е.С., Лешкевич Е.А.</i> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ ТОНКОГО ШЛИФОВАНИЯ ШАРОВ ИЗ СТЕКЛА И ЦВЕТНОГО КАМНЯ</b> .....	295
<i>Оджаев В.Б., Олешкевич А.Н., Карпович В.А., Просолович В.С., Сернов С.П., Лапчук Т.М., Лапчук Н.М.</i> <b>ЭПР ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ В ПЛЕНКАХ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ФОСФОРА И СУРЬМЫ</b> .....	296
<i>Титович Е.В., Потепалов П.О., Петкевич М.Н., Киселев М.Г.</i> <b>АЛГОРИТМ И МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕАНСА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ</b> .....	298
<i>Попов Р.Ю., Богдан Е.О., Белугин Д.С., Колонтаева Т.В.</i> <b>ТЕПЛО- И ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЖАРОТУШЕНИЯ, ПОТЕРЯВШИХ СВОИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b> .....	299
<i>Дятлова Е.М., Попов Р.Ю., Мухлядо В.И., Варфоломеев В.С., Шамкалович В.И.</i> <b>ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ</b> .....	301
<i>Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С., Солодуха В.А., Петлицкий А.Н., Соловьев Я.А., Керенцев А.Ф.</i> <b>ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРОВ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ МОП ТРАНЗИСТОРОВ КП723 И КП7209 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРМОУДАРОВ</b> .....	303
<i>Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С., Солодуха В.А., Петлицкий А.Н., Соловьев Я.А., Керенцев А.Ф.</i> <b>АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ СЛОЯ ПОСАДКИ КРИСТАЛЛОВ В МОЩНЫХ МОП ТРАНЗИСТОРАХ ИЗ РАЗНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СПЕКТРОВ ПРИ ТЕРМОШОКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ</b> .....	305
<i>Алешкевич Н.Н., Будай А.Г., Кныш В.П., Малый С.В., Наумович Н.М., Юбка А.П.</i> <b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ</b> .....	307

## РАССЕЯНИЯ ФАР

<i>Royzman V., Voznyak A., Bubulis A.</i> RESEARCH OF UNSEALING PROBLEM IN CYLINDRICAL SEALED VOLUMES OF VARIOUS PURPOSES BY THE EXAMPLE OF THIN-FILM CAPACITORS	309
<i>Иванов В.А., Красовский В.В., Гременок В.Ф.</i> ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ PbSnTe	311
<i>Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Лесота А.В.</i> ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАРТЕНСИТНЫХ ПЕРЕХОДОВ В TiNi СПЛАВЕ	313
<i>Степаненко Д.А., Бунчук К.А., Емельянова А.С., Плескач М.А., Солодкая Н.В.</i> ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТРОМБОЭКТОМИИ	314
<i>Есьман Г.А., Новицкий М.В.</i> ПРИБОР КОНТРОЛЯ РОЛИКОВ	316
<i>Баев А.Р., Майоров А.Л., Захаренко В.В., Размыслович Г.И., Парадинец В.В.</i> ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАССЕЙВАНИЯ УПРУГИХ ВОЛН НЕОДНОРОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ	318
<i>Баев А.Р., Майоров А.Л., Левкович Н.В., Асадчая М.В., Жаворонков К.Г.</i> ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	320

## Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ	322
<i>Данильчик А.В., Длугонович В.А., Ждановский В.А., Крейдич А.В., Луценко Е.В., Никоненко С.В.</i> РЕФЕРЕНСНЫЕ СВЕТОДИОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАДИОМЕТРИИ	323
<i>Дейнека Р.В., Горбаченя К.Н., Ясюкевич А.С., Кисель В.Э., Мальцев В.В., Леонюк Н.И., Кулешов Н.В.</i> БЕЗОПАСНЫЙ ДЛЯ ГЛАЗ КОМПАКТНЫЙ ЛАЗЕР БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА	325
<i>Артюхина Н.К., Самбрано Л.Ф.</i> АБЕРРАЦИОННЫЙ РАСЧЁТ ДВУХЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА С ТРЕМЯ ОТРАЖЕНИЯМИ	327
<i>Дернович О.П., Курильчик С.В., Горбаченя К.Н., Кисель В.Э., Кулешов Н.В., Кравцов А.В., Гурецкий С.А., Колесова И.М.</i> ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ЭПИТАКСИАЛЬНОМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СЛОЕ Er(1.3 ат. %):KGd <sub>0.2</sub> Yb <sub>0.15</sub> Y <sub>0.65</sub> (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> С РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКОЙ	328
<i>Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.</i> СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ	330
<i>Rudnikov A., Kisel V., Yasukevich A., Hovhannesyan K., Petrosyan A., Kuleshov N.</i> Yb:CALYO BASED BROAD-BAND SEEDED CHIRPED PULSE REGENERATIVE AMPLIFIER	332
<i>Скопцов Н.А., Лойко П.А., Глазунов И.В., Маляревич А.М., Кулешов Н.В., Юмашев К.В., Adrian Goldstein, Zeev Burshtein, Ehud Galun.</i> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНОЙ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ Co <sup>2+</sup> :MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	334
<i>Маханько Д.С., Луговик А.Ю., Шкадаревич А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ	335
<i>Ийд Кусай Мохамад, Фёдорцев Р.В., Шкадаревич А.П.</i> СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ НАВОДКИ ОПТИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА	337

<i>Анисович А.Г., Бакаев А.Г., Маркевич М.И., Мальшико А.М., Чапланов А.М., Журавлева В.И., Щербакова Е.Н.</i> <b>МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ</b> .....	339
<i>Артюхина Н.К., Самусенко А.А.</i> <b>ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА</b> .....	341
<i>Артюхина Н.К., Клочко Т.Р., Чернавциц Д.А.</i> <b>КОРРЕКЦИЯ КРИВИЗНЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТРЕХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ</b> .....	342
<i>Беляев Б.И., Домарацкий А.В., Казак А.А., Кучинский П.В., Станчик В.В.</i> <b>МАЛОГАБАРИТНАЯ БОРТОВАЯ НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ</b> .....	344
<i>Борздов А.В., Борздов В.М.</i> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТООТКЛИКА СУБМИКРОННОГО КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b> .....	346
<i>Бобученко Д.С., Бумай Ю.А., Цвирко В.И.</i> <b>СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СИНИХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</b> .....	347
<i>Бручковский И.И., Демин В.С., Красовский А.Н.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ШУМА В ПРОЦЕДУРЕ АНАЛИЗА ПО МЕТОДУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ</b> .....	348
<i>Власовец Н.С., Козерук А.С., Кудряшов А.А.</i> <b>ПАНОРАМНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР СКАНИРУЮЩЕГО ТИПА</b> .....	350
<i>Вилейшикова Е.В., Лойко П.А., Хайдуков Н.М., Юмашев К.В.</i> <b>СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ <math>Er^{3+}:K_2YF_5</math>, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ</b> .....	352
<i>Wolkenstein S.S., Khmyl A.A., Kerentsev A.F., Kovalchuk N.S., Solovjov J.A., Rubtsevitch I.I.</i> <b>LASER PHOTOTHERMOACOUSTIC MICROSCOPY VERIFICATION</b> .....	354
<i>Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ РАЗОГРЕВА СВЕТОДИОДОВ SREE И REBEL ПРИ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКАХ</b> .....	356
<i>Гацкевич Е.И., Ивлев Г.Д., Гундина М.А., Князев М.А.</i> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО НАГРЕВА ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ И КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ</b> .....	357
<i>Гацкевич Е.И., Альхимович М.А.</i> <b>ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ</b> .....	359
<i>Дернович О.П., Демеш М.П., Гусакова Н.В., Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В., Павлюк А.А., Корниенко А.А., Дунина Е.Б.</i> <b>СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА <math>Sm^{3+}:KY(WO_4)_2</math></b> .....	361
<i>Дейнека Р.В., Горбаченя К.Н., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В., Шеховцов А.Н., Космына М.Б.</i> <b><math>Er, Yb:Ca_3Re_2(VO_3)_4</math> (Re=Y, Gd) – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ, ИЗЛУЧАЮЩИХ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,5–1,6 МКМ</b> .....	362
<i>Есман А.К., Потачиц В.А., Зыков Г.Л.</i> <b>ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ</b> .....	364
<i>Зайцев Е.А., Сидорчук В.Е.</i> <b>ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ БИЕНИЯ ВАЛА ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ</b> .....	366
<i>Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О.</i> <b>ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ</b> .....	368
<i>Козлов В.Л., Шмигирев Е.Ф.</i> <b>ВЛИЯНИЕ ДИСТОРИИ ОБЪЕКТИВОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯ</b> .....	370
<i>Козлов В.Л., Згировская Н.В.</i> <b>АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ОТТИСКОВ ПЕЧАТЕЙ И ШТАМПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ</b> .....	372

<b>Королёв М.Н. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДВУХОСНОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ</b> .....	374
<b>Кривицкий П.Г., Исаев А.В., Матюшевский В.М., Оксенчук И.Д. ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ И ВЫХОДА НА РАБОЧИЙ РЕЖИМ ВИБРОПРИВОДА ЦИФРОВОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА</b> .....	376
<b>Кривицкий П.Г., Исаев А.В., Матюшевский В.М., Оксенчук И.Д. СТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ВИБРОПРИВОДА ЦИФРОВОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА ПО ФАЗЕ МЕЖДУ СИГНАЛОМ УПРАВЛЕНИЯ ДРАЙВЕРОМ ВИБРОПРИВОДА И СИГНАЛОМ ДАТЧИКА УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ</b> .....	377
<b>Манего С.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ</b> .....	379
<b>Ксенофонтов М.А., Поляков А.В. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ</b> .....	381
<b>Куприй А.И., Безуглый М.А. НЕИНВАЗИВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ГЛЮКОМЕТР С ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ</b> .....	383
<b>Муравьёв А.В. ПАССИВНАЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВИЗОРА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ</b> .....	385
<b>Попечиц В.И. СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ЦВЕТОКОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВКИ СОЛЕЙ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ РАСТВОРОВ КРАСИТЕЛЕЙ</b> .....	387
<b>Сернов С.П., Балохонов Д.В. МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА НАКОПИТЕЛЬНОГО СУММИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ СВЕТОДИОДОВ С БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДЬЮ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ</b> .....	389
<b>Slabinoha M.O., Klochko N.B., Kuchirka Y.M. HARDWARE AND SOFTWARE FOR REMOTE CONTROL AND MONITORING OF LABORATORY STAND FOR THE OPERATION RESEARCH OF SOLAR PANELS</b> .....	390
<b>Усольцев А.В. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЗАДАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОРГАНИЗМА</b> .....	392
<b>Терещенко Н.Ф., Швыдкий В.В. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ</b> .....	393
<b>Свирина Л.П. КОНКУРЕНЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ АНИЗОТРОПИИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ И АНИЗОТРОПИИ РЕЗОНАТОРА В ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ</b> .....	395
<b>Усольцева А.В. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ОБУГЛИВАНИЕМ</b> .....	397
<b>Ясюкевич А.С., Дернович О.П., Кулешов Н.В., Колобкова Е.В. СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ФТОР-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЭРБИЯ И ИТТЕРБИЯ</b> .....	399
<b>Цедик В.А., Шахлевич Г.М. СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТРИЦЫ ДЛЯ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ</b> .....	401
<b>Звонкович А.В., Фёдорцев Р.В. ОПТИМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ</b> .....	402
<b>Фёдорцев Р.В., Ийд Кусай Мохамад, Шкадаревич А.П., Фуфаев А.В., Рыжков С.А. ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЁСТКОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОЛЛИМАТОРНОГО ПРИЦЕЛА ЗАКРЫТОГО ТИПА</b> .....	404
<b>Чернавциц Д.А., Фёдорцев Р.В. МЕТОД ИМИТАЦИИ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ</b> .....	406

<i>Аксеник А.С., Фёдорцев Р.В.</i> ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРЁХОСЕВОЙ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДВЕС ДЛЯ ВИДЕОКАМЕР.....	408
<i>Артюхина Н.К., Пероса Лаура</i> АФОКАЛЬНАЯ АНАСТИГМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗ ТРЕХ ЗЕРКАЛ.....	409

**Секция 5. УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ И ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ  
ДЛЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

<i>Воронина М.В., Мороз О.Н.</i> «ПЕРЕВЁРНУТАЯ» МОДЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ.....	412
<i>Гурко А.И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛА МЕНЕДЖМЕНТА С УЧЕТОМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА.....	413
<i>Журкевич М.В., Буриштын В.Э., Кравцова В.В.</i> ОРГАНИЗАЦИЯ СТАРТАПОВ.....	415
<i>Кондратьева Н.А., Романчук В.М., Гундина М.А., Прусова И.В.</i> МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИНФОРМАТИКА» СТУДЕНТОВ ПСФ.....	417
<i>Лукьяненко А.Ю.</i> МЕСТО СВОБОДНОГО И ОТКРЫТОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ИННОВАЦИОННОМ РАЗВИТИИ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	419
<i>Ляхевич А.Г.</i> ОЦЕНКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	422
<i>Кондратьева Н.А., Прихач Н.К.</i> ЭУМК ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МАТЕМАТИКА» ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА.....	424
<i>Серченя Т.И., Ладутько М.М.</i> ОБЩАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ БЕЛАРУСИ.....	426
<i>Филиппова М.В., Волошин К.П., Сегол Р.И.</i> ОБОБЩЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ.....	428
<i>Ци Ци, Ю.Г. Алексеев</i> ЗОНА РАЗВИТИЯ НОВОЙ И ВЫСОКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В НАНКИНЕ.....	429
<i>Мелюшин П.В., Афанасенко А.В.</i> УЧАСТИЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В ФОРМИРОВАНИИ КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ, УЧАСТВУЮЩИХ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «ШЕЛКОВЫЙ ПУТЬ».....	431
<i>Акунец В.П., Зысь Т.А.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТРУДОВЫМ КОЛЛЕКТИВОМ.....	433
<i>Леутина Л.И.</i> НАЛОГООБЛОЖЕНИЕ ДОХОДОВ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.....	434
<i>Серченя Т.И., Родионова О.В.</i> ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ.....	436
<i>Козленкова О.В., Кузнецова О.А.</i> ФОРМЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТОРГОВЛИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ.....	438
<i>Гурина Е.В.</i> КЛАСТЕРИЗАЦИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАСТЕРНОЙ ПОЛИТИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	440
<i>Гурина Е.В., Дробышева К.В., Сычев Д.Р.</i> ВЕНЧУРНОЕ ФИНАНСИРОВАНИЕ.....	441
<i>Мелюшин В.П., Ворошина Е.В., Афанасенко А.В.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	443

<i>Третьякова Е.С., Третьяков-Савич Е.С.</i> <b>СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ПЕРСОНАЛОМ</b> .....	445
<i>Минько М.В.</i> <b>ФОРМЫ И БИЗНЕС-МОДЕЛИ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ</b> .....	447
<i>Ворошина Е.В.</i> <b>НОВАЯ ПАРАДИГМА ФИНАНСИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ</b> .....	449
<i>Афанасенко А.В.</i> <b>ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАДРОВ СОВМЕСТНЫХ БЕЛОРУССКО-КИТАЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ</b> .....	451
<i>Гурина Е.В., Лукьяненко А.Ю.</i> <b>ПОТЕНЦИАЛ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИННОВАЦИОННО-ИНВЕСТИЦИОННОМ РАЗВИТИИ ЭКОНОМИКИ СТРАНЫ</b> .....	452
<i>Мелюшин П.В., Лукьяненко А.Ю.</i> <b>ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПЛАНИРОВАНИИ</b> .....	454

Научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2017

Материалы  
10-й Международной научно-технической конференции

1–3 ноября 2017 года  
Минск, Республика Беларусь

Ответственный за выпуск *А.К. Тявловский*  
Оформление и компьютерная вёрстка *К.В. Пантелеева*

Подписано в печать 25.10.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 54,75. Уч.-изд. л. 21,41. Тираж 140. Заказ 902.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.