МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении

Материалы IX международной научно-практической конференции

(Минск, 7 апреля 2021 года)

В рамках выставки «Автоматизация, электроника – 2021»

Минск БНТУ 2021

Редакционная коллегия:

Маляревич А.М. (главный редактор),
Околов А.Р. (зам. гл. редактора),
Лобатый А.А., Дербан А.Н., Реентович И.А.

Составитель:
Дербан А.Н.

В сборнике опубликованы материалы IX Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении», которые посвящены выработке теоретических решений, а также разработке практических подходов, направленных на создание, реализацию и внедрение инновационных достижений в областях реального сектора экономики: машино- и приборостроение, автоматизация и робототехника, получение и обработка современных материалов, оптимизация потребления и развитие альтернативных источников энергии, применение технологий искусственного интеллекта.

Рекомендован научным работникам, преподавателям, студентам, магистрантам и аспирантам высших учебных заведений технического и технико-технологического профиля.

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

1. **КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА**
Бумай А.Ю., Лобатый А.А. 7

2. **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕВЕРСИВНОЙ СТРУИ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**
Жук А.Н.[1], Качанов И.В.[2], Шаталов И.М.[2], Щербакова М.К.[2], Кособуцкий А.А.[2] 9

3. **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ РЕВЕРСИВНОЙ СТРУИ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ**
Жук А.Н.[1], Качанов И.В.[2], Шаталов И.М.[2], Щербакова М.К.[2], Кособуцкий А.А.[2] 11

4. **ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ КОРРОЗИИ**
Жук А.Н.[1], Качанов И.В.[2], Шаталов И.М.[2], Щербакова М.К.[2], Кособуцкий А.А.[2] 13

5. **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЕРХНЕЙ ОЦЕНКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СКОРОСТНОГО, КОМБИНИРОВАННОГО, ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДОРОЖНЫХ РЕЗЦОВ**
Быков К. Ю., Качанов И. В., Шаталов И. М., Ленкевич С. А. 15

6. **ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В АСКУЭ**
Гутич И.И., Коваленко Е.А 16

7. **МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНЖЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ LE-JETRONIC**
Чаплыгин Д.Ю., Околов А.Р. 17

8. **СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ В КАНАЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**
Опейко О.Ф. 19

9. **АВТОМАТИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ**
Липницкий Л.А.[1], Шалькевич П.К.[1], Пильгун Т.В.[2] 21

10. **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ/ВЫГРУЗКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН СО СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ**
Лившиц Ю.Е., Буйко К.С. 24

11. **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ ДОСТИЖИМИОСТИ МАНИПУЛЯТОРА РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS WB**
Напрасников В.В. [1], Полозков Ю.В. [1], Соловьев А Н. [2], Скалиух А.С. [3] 25

12. **ДВУХУРОВНЕВАЯ АСКУЭ ДЛЯ ЖИЛОГО СЕКТОРА**
Гутич И.И., Задорожная В.А. 28

13. **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОНЛАЙН-ШКОЛОЙ ПРОГРАММИРОВАНИЯ**
Здончик Д.И., Гутич И.И. 30

14. **ОЦЕНКА МАССЫ КОРОВЫ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТИ**
Немирович С.И., Сеньков А.Г 31

15. **ПРИНЦИПЫ ТАРИФНОЙ ПОЛИТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ**
Сычёва Д.А., Гутич И.И., Реентович И.А. 33

16. **ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТА БЛА ПРИ ВНЕСЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ**
Сеньков А.Г. 34

17. **АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ**
Белявин К.Е.[1], Белоцерковский М.А.[2], Сосновский И.А.[2], Курилёнок А.А.[2] 36

18. **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА**
Нитиевский С.А. 38

19. **ГАРМОНИЗАЦИЯ СТАНДАРТОВ ISO 683-1:2016, ISO 683-2:2016, ISO 683-3:2019 КАК ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ИМПОТРОЗАМЕЩАНИЯ ПРОКАТА**
Покровский А.И., Хина Б.Б., Толкачева О.А., Глушаков А.Н., Хроль И.Н., Шенец С.Л. 40

20. **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЧЕТЧИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**
Чиж Е.М., Гутич И.И. 42

21. **МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛАСТЕРАМИ ТИТАНА**
Акула И.П.[1], Маркевич М.И.[1], Малышко А.Н[1]., Чекан Н.М.[1], Щербакова Е.Н.[2] 43

22. **ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ**
Маркевич М.И.[1], Малышко А.Н[1]., Журавлева В.И.[2], Щербакова Е.Н.[3] 45

23. **УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА МОДИФИЦИРОВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА**
Алексеев Ю.Г., Будницкий А.С., Сенченко Г.М., Веремеюк С.Р 47

24. **ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗМЕРНОЙ И ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**
Королёв А.Ю., Нисс В.С., Паршуто А.Э., Сорока Е.В 49

25. **ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**
Алексеев Ю.Г., Паршуто А.Э., Сенченко Г.М., Янович В.А 51

26. **ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТРИЧНЫХ КОРОНАРНЫХ СТЕНТОВ**
Нисс В.С., Гавриленко В.В. 53

27. **ПОЛУЧЕНИЕ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**
Нисс В.С., Королёв А.Ю., Паршуто А.Э., Будницкий А.С. 55

28. **ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС РЕЖИМОВ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**
Поминов А.Д., Лившиц Ю.Е 57

29. **УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**
Васильев С. В. 58

30. **ПЕРЕХОД ПРОИЗВОДСТВА К ИНДУСТРИИ 4.0**
Дулуб Е.Д., Лившиц Ю.Е. 60

31. **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АСУТП ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОРЫВОВ**
Синицын А.В., Лившиц Ю.Е 61

32. **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА UR3**
Околов А.Р., Матрунчик Ю.Н., Абуфанас М. 63

33. **РОБОТИЗИРОВАННЫЙ СКЛАД ЛИСТОВОГО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА**
Алдакушин А.Г.[1], Tobola P.[2] 65

34. **ЛАБОРАТОРНЫЙ УЧЕБНЫЙ КОМПЛЕКС «ЛИФТ»**
Беленков М.А., Громыко В.А., Лившиц Ю.Е. 67

35. **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ**
Белявин К.Е., Щукин В.Я., Кожевникова Г.В., Кожевников Д.А 68

36. **ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**
Лившиц Ю.Е., Савёлов П.И. 70

37. **ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРОВ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА**
Гируцкий И.И. 72

38. **КОНСТРУКТИВНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ 3D ПРИНТЕРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SCARA**
Гурский Н.Н., Артющик В.С., Корольчук О.В 74

39. **ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ НАДЕЖНЫХ, ДОЛГОВЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНО- И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**
Василевич Ю.В.[1], Федотов Д.А.[2], Неумержицкая Е.Ю.[3], Беляцкая Л.Н.[1], Чигарев В.А[1] 75

40. **ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ И ЗАЩИТЫ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ОТ КОРРОЗИИ**
Качанов И. В., Ключников В. А., Шаталов И. М., Ковалевич В. С. 77

41. **НОВЫЕ СПЛАВЫ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**
Кожевникова Г.В., Щукин В.Я., Дубенец С.С. 79

42. **ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТЕРЖНЕВОЙ ДЕТАЛИ**
Качанов И.В., Власов В.В 81

43. **ОРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯ ESP-12**
Русак Е.О., Воюш Н.В. 83

44. **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ СКАЛЯРНОМ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ**
Фираго Б.И., Александровский С.В. 84

45. **СПОСОБ СИНТЕЗА ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ХРОМАТИЧЕСКОЙ ГАММЫ ИЗ КОЛЕБАНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ**
Тимошевич В.Б. *86*

46. **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПРОГРАММЫ PROTEUS 8 ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА»**
Тимошевич В.Б. *88*

47. **РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ ПОСТОЯНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ**
Гульков Г.И. *89*

48. **ОТКРЫТЫЙ СИМУЛЯТОР ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ - GAZEBO**
Дербан А.Н.[1], Бусько А.М.[2] *91*

49. **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПОТОКОВ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**
Вельченко А.А., Мирончук В.И. *92*

50. **НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ СОЗДАНИЯ АСКУЭ**
Макаренко Л.С., Глядко В.В., Реентович И.А *94*

51. **УМНЫЕ РОБОТЫ В КОСМОСЕ**
Джига Д.А., Гутич И.И. *95*

52. **АВТОКОМПЕНСАТОР ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ В КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**
Дубинин С.В. *96*

53. **СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**
Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т. *98*

54. **НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ТЭЦ**
Кулаков Г. Т., Телюк Н. Е. *101*

55. **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ**
Кулаков Г.Т., Воюш Н.В., Сазоненко Е.Р *103*

56. **ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ И ТИПОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ЗА КОТЛОМ**
Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Воюш Н.В., Колесников В.М. *105*

57. **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ 3D МОДЕЛЕЙ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**
Попок Н.Н., Портянко С.А., Анисимов В.С., Косяк Л.Н., Гвоздь Г.И., Тихон Е.М. *107*

58. **ПОВЫШЕНИЕ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И ЧЕЛОВЕКА**
Новичихин Р.В., Дербан А.Н., Журавлёва Е.Р., Реентович И.А. *109*

УДК 629.7+531.383

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

Бумай А.Ю., Лобатый А.А.
1). Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Среди множества задач обработки информации наиболее рассматриваемой является задача оценивания информации, поступающей с различных измерителей. В общем случае сигналы, поступающие с измерителей, являются случайными и подверженными воздействию различных помех – возмущений. В процессе оценивания рассматриваемых сигналов, возникает необходимость обработки измерений (наблюдений) с целью уменьшения влияния случайных факторов [1]. Как правило, такие задачи решают навигационные системы, устанавливаемые на движущихся объектах (ДО) [2]. Среди самых распространенных ДО можно отметить беспилотные летательные аппараты (БЛА). Навигационные системы БЛА, обрабатывают информацию, которая преимущественно отличается достоверностью и точностью, так как получена от измерителей с различными принципами работы и имеющих некоторый фактор неопределенности, в силу физических и технических параметров. Рассмотренные факты, приводят к постановке задачи об комплексировании различных источников информации, с целью повысить достоверность и точность выделения полезной составляющей [2].

Рассматривается задача оценивания информации, поступающей от различных измерителей навигационной системы БЛА. Задача определения оптимальных значений процесса $X(t)$ на основании имеющихся наблюдений в виде вектора $Z(t_1)$ в зависимости от того, как расположен момент времени t_1 по отношению к моменту времени t представляют собой задачи оценивания (фильтрации, сглаживания или экстраполяции). Задача фильтрации является основной [2]. Осуществлено комплексирование измерителей и соответствующих фильтров. Представлена структурная схема фильтрации и комплексирования рис.1.

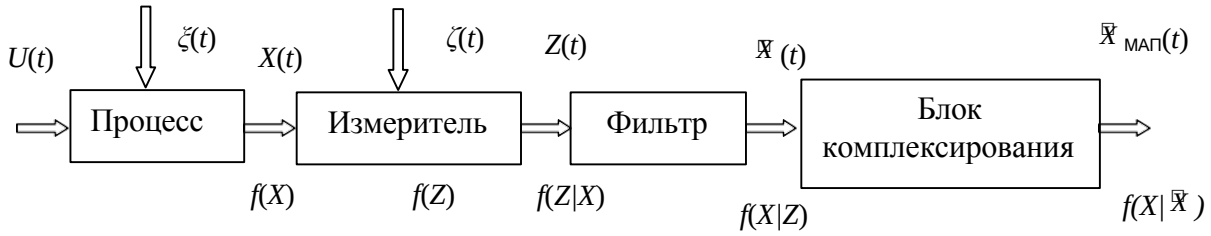


Рис.1. Структура процесса комплексирования

Предложен критерий оптимальной оценки процесса

$$\hat{X}_{\text{МАП}}(t) = \underset{\hat{X}}{argmax}\ f(X \mid \hat{X})$$

В качестве примера рассмотрена одномерна система с двумя измерителями рис.2. На рис. 2а, 2б – график выходных сигналов измерителя z1, z2; 2в – график изменения выходных сигналов фильтров x̂ ф1, x̂ ф2; 2г – график входного сигнала x(t) и график сигнала комплексирования двух фильтров $x_к$.

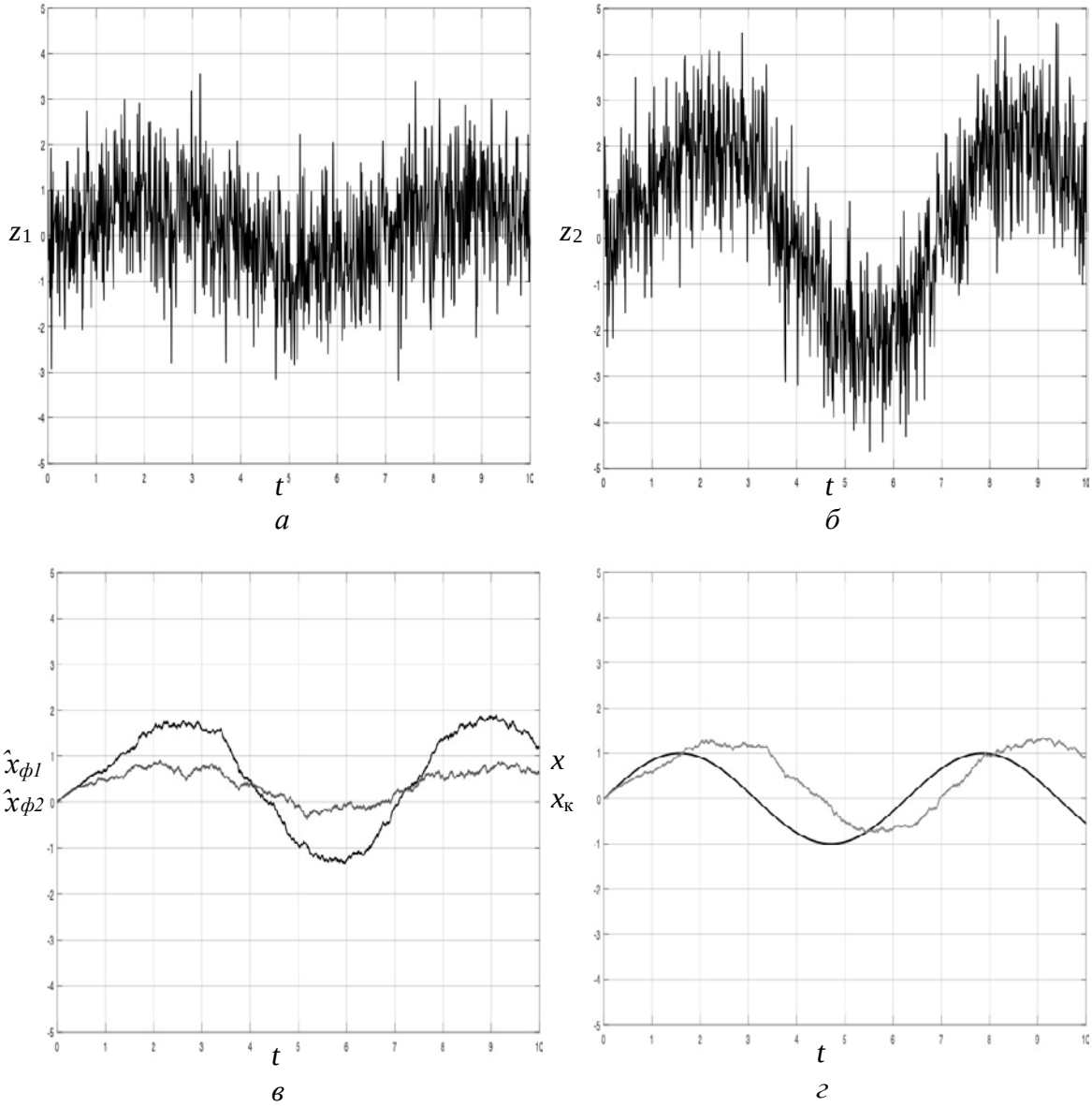


Рис.2. Результаты математического моделирования

1. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Лобатый А.А., Бумай А.Ю. Особенности построения алгоритмов оценивания параметров многомерных случайных процессов / А.А.
3. Лобатый, А.Ю. Бумай // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 1. – С. 24-32.

УДК 669:620.197

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕВЕРСИВНОЙ СТРУИ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Жук А.Н.[1], Качанов И.В.[2], Шаталов И.М.[2], Щербакова М.К.[2], Кособуцкий А.А.[2]

1). РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова, Минск, Республика Беларусь

2). Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь Минск, Республика Беларусь

На кафедре «ГЭСВТГ» БНТУ в 2010 году была предложена новая технология реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии под лазерную резку или окраску, а также струйный блок для ее осуществления.

При подключении такого струйного блока к насосной установке поток рабочей жидкости после взаимодействия с очищаемой поверхностью разворачивается на 180° относительно своего первоначального движения. Этот разворот обеспечивает формирование реактивной силы, которая, складываясь с силой от воздействия струи, приводит к увеличению давления p_{max} струйного воздействия в 1,5–1,75 раза (теоретически – в 2 раза) по сравнению с традиционной схемой очистки.

Параметр силы (давления) струйного воздействия на обрабатываемую поверхность является одним из основных при разработке технологии РСО и выборе насосного оборудования, предназначенного для реализации технологии.

Анализ показал, что значительный объем теоретических исследований по расчету силы (давления) струйного воздействия основан на использовании теоремы об изменении количества движения, что не позволяет авторам установить взаимосвязь между усилием (давлением) обработки и механическими свойствами обрабатываемых материалов, включая технологические параметры процесса РСО.

Для получения решения, лишенного указанных недостатков, предлагается использовать теоретический метод, который в механике сплошной среды известен как метод верхней оценки.

Для проведения расчета процесса РСО использовалось кинематически возможное поле (рисунок 1, а), состоящее из жестких однородных блоков.

Для установления давления от воздействия реверсивной струи на плоскую преграду примем следующие допущения: обрабатываемая поверхность считается плоским слоем коррозионных отложений, который покрывает листовую поверхность и имеет одинаковую толщину, распространяясь на неограниченную длину вправо и влево от оси симметрии струи; материал обрабатываемой поверхности считается однородным; вид принятого КВП не зависит от изменения скорости струи

в процессе разрушения слоя коррозионных отложений; действие сил инерции не оказывает влияния на характер разрушения слоя коррозионных отложений.

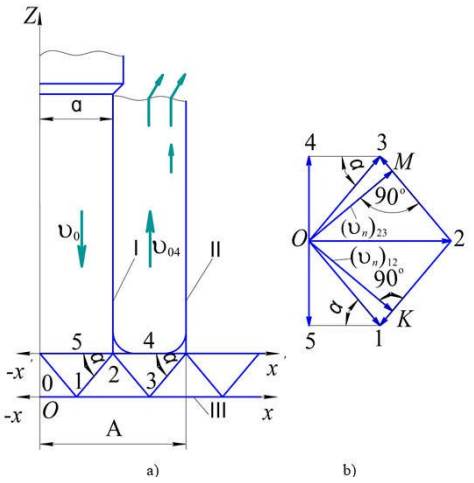


Рисунок 1 – *Кинематически возможное поле (КВП) линий скольжения (а) и годограф скоростей (b), принятые для анализа процесса реверсивно-струйной очистки: I – струя рабочей жидкости; II – корпус струйного блока; III – обрабатываемая поверхность*

Для определения величины струйного давления на поверхность коррозионного слоя воспользуемся условием баланса мощностей от действия внешних и внутренних сил:

$$W_{Гстр} = W_{вн}, \qquad (1)$$

где $W_{Гстр}$ – гидравлическая мощность струи, воздействующей на преграду; $W_{вн}$ – мощность внутренних сил, действующих на поверхностях разрыва и контактного трения.

В результате решения (1) с учетом вышеназванных допущений и расчетной схемы (рисунок 1) получим выражение для расчета минимального давления разрушения:

$$p_{\min} = 2,6\sigma_s + \rho\upsilon_{01}^2(1+\lambda). \qquad (2)$$

Для практического использования (2) с учетом максимальной гидравлической мощности реверсивной струи, затраченной на разрушение коррозионного слоя, при $\upsilon_{01} = 0,5\upsilon_{стр}$ формула (2) примет вид:

$$p_{\min} = 2,6\sigma_s + 0,25\rho(1+\lambda)\upsilon_{стр}^2. \qquad (3)$$

Отличительной особенностью уравнения (3) по сравнению с аналогичными формулами для определения струйного давления следует считать то, что оно предназначено для расчета давления именно реверсивной струи на преграду с помощью коэффициента обжатия струи λ, характеризующего дополнительное силовое воздействие струи на преграду уже после разворота ее на 180° в процессе реверсивного течения. Дополнительно научное и практическое значения формулы (3) заключаются в том, что она в результате оптимизации параметра поля α позволяет определять минимальное давление разрушения $p_{\min}$ в зависимости от скорости струи $\upsilon_{стр}$ и физико-механических свойств (σ_s, ρ) разрушаемого материала.

УДК 669:620.197

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ РЕВЕРСИВНОЙ СТРУИ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Жук А.Н.[1], Качанов И.В.[2], Шаталов И.М.[2], Щербакова М.К.[2], Кособуцкий А.А.[2]

1). РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова, Минск, Республика Беларусь

2). Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь Минск, Республика Беларусь

Одним из основных параметров при разработке технологии РСО, предложенной на кафедре «ГЭСВТГ» БНТУ и подборе оборудования для её осуществления – является сила воздействия реверсивной струи F на обрабатываемую поверхность заготовки-препятствия (ЗП).

Для измерения силы струйного воздействия F на плоскую поверхность была разработана конструкция динамометра, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.

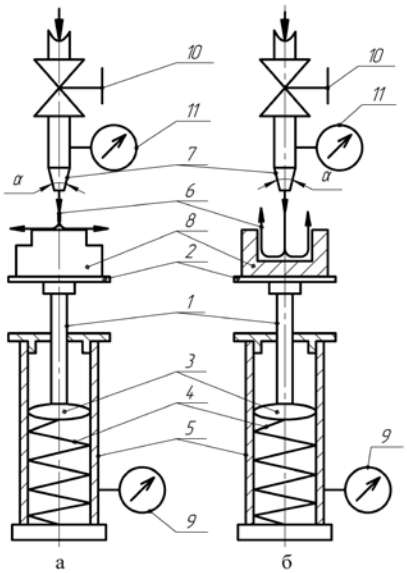


Рисунок 1 – Принципиальная схема динамометра для измерения силы от воздействия струи на преграду: а – схема радиального течения струи после взаимодействия её с плоской поверхностью; б – схема реверсивного течения струи после взаимодействия её с плоской поверхностью; 1 – шток; 2 – площадка-опор; 3 – манжета; 4 – пружина; 5 – корпус; 6 – рабочая жидкость; 7 – сопло; 8 – заготовка-препятствия; 9 – шкала динамометра; 10 – вентиль; 11 – манометр

Силовое воздействие струи 6 рабочей жидкости, вытекающей из сопла 7 и действующей на ЗП 8, передается через шток 1 на пружину 4 и регистрируется в диапазоне от 0 до 50 Н по шкале 9 динамометра (рисунок 1). Принимая погрешность измерений, равную половине цены деления шкалы динамометра, была установлена абсолютная погрешность ΔF определяемой силы F, равная ±0,1 Н и не превышающая 2 % от максимальной величины измеренной нагрузки.

Для изменения давления и скорости струи рабочей жидкости в измерительной схеме смонтирован регулировочный вентиль 10. Регистрация давления в потоке жидкости на входе в сопло 7 осуществлялась с помощью образцового манометра 11 марки МП-160

(ГОСТ 15150-69, диапазон измерений 1–25 МПа, класс точности 2,5). Формирование струи 6 происходило в коническом сопле 7 с диаметром d_c = 1,2 мм, и углом конусности α = 45°.

Для предохранения элементов динамометра от коррозии использовалась полиэтиленовая защита (на рисунке 1 не показана).

Разработанная конструкция динамометра позволяет изучить влияние основных параметров (давление, расход, геометрия сопел, соотношение диаметров сопла d_c и плоской поверхности D_0 ЗП и т.д.), определяющих силовой режим процесса РСО.

Для проведения экспериментов, направленных на установление зависимостей $F = f(p_{вх})$, $F = f(L)$, $F = f(\lambda)$ отражающих влияние давления на входе в сопло $p_{вх}$, расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности L, коэффициента обжатия λ на величину силы давления струи F рабочей жидкости использовались ЗП различной формы.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что при всех проведенных исследованиях независимо от расстояния L и значения давления $p_{вх}$ на входе в сопло имеется оптимальный диапазон значений $\lambda_{опт}$ = 0,05–0,08 в рамках которого сила F от воздействия реверсивной струи имеет наибольшие значения. Данные по силовому режиму слева от указанного диапазона ($\lambda \to 0{,}025$) характеризуют резкое падение усилия F, а при $\lambda > 0{,}08$ отмечается плавный спад силы F от воздействия реверсивной струи.

Такой характер силового воздействия реверсивной струи в зависимости от коэффициента обжатия λ полностью совпадает с результатами теоретического анализа. Из этого анализа следует, что минимальное давление разрушения слоя коррозии на очищаемой поверхности имеет место при обжатии струи λ = 0,063, при этом, струйное давление на преграду при реверсивном течении (при одинаковых значениях давления на входе в сопло $p_{вх}$) на 35–40 % превышает аналогичные значения, установленные для струи с радиальным растеканием жидкости по очищаемой поверхности.

В заключение следует отметить, что использование технологии РСО металлических плоских поверхностей в исследованном диапазоне давлений $p_{вх}$ = 3,5–23,0 МПа и расстояний от сопла до обрабатываемой поверхности L = 8–50 мм обеспечивает наибольшее силовое воздействие на плоскую поверхность заготовки-препятствия (независимо от давления на входе $p_{вх}$ и расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности L) при коэффициенте обжатия струи λ = 0,063, что в свою очередь существенно повышает качество очистки и энергоэффективность предлагаемой технологии.

УДК 669:620.197

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ КОРРОЗИИ

Жук А.Н.[1], Качанов И.В.[2], Шаталов И.М.[2], Щербакова М.К.[2], Кособуцкий А.А.[2]

1). РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова, Минск, Республика Беларусь

2). Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь Минск, Республика Беларусь

Эффективность реализации целого ряда технологических процессов напрямую зависит от качества очистки поверхностей от коррозии. Так, например, для подготовки стальных листов под лазерную резку (ЛР) (в настоящее время на промышленных предприятиях Республики Беларусь насчитывается порядка 300 комплексов, на которых ежегодно разрезается более 80 тыс. тон листовой стали) необходимо после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью R_a = 0,4–1,0 мкм с минимальным уровнем упрочнения (микротвердость H_μ после обработки по сравнению с исходным значением $H_{\mu 0}$ должна находится в пределах H_μ = 1,5–1,6$H_{\mu 0}$) и низкой отражательной способностью. Обеспечение такого качества поверхности является экономически затратным.

Исследования, проведенные в лаборатории кафедры «ГЭСВТГ» БНТУ показали, что весьма экономично и с гораздо меньшими затратами мощности можно подготовить листовые стальные материалы к последующей ЛР применяя для удаления продуктов коррозии реверсивно-струйную очистку (РСО), основанную на струйном воздействии рабочих жидкостей на обрабатываемую поверхность. При этом в качестве рабочих жидкостей используются водные составы с добавками на начальном этапе очистки речного песка и бентонитовой глины – на завершающем этапе. При такой последовательности обработки листовых материалов на очищенной поверхности формируется микронеровность R_a порядка 2–4 мкм, покрытая антикоррозионным защитным покрытием, которое имеет химсостав бентонитовой глины и характеризуется низкой отражательной способностью, что является актуальным при ЛР. Испытания на лазерных комплексах, относящиеся по типу к газовым лазерам, показали повышение скорости ЛР для образцов, обработанных по указанной технологии на 10–20%, по сравнению, например, с материалами, очищенными с применением традиционных (дробеструйных, пескоструйных) технологий.

Экспериментальными исследованиями была установлена целесообразность проведения очистки в три этапа. При этом на первом этапе очистки для обеспечения повышенной производительности в качестве такой рабочей жидкости, использовалась вода, содержащая

речной песок с размером фракций 0,1–0,63 мм и полиакриламид. Концентрации речного песка $K_{р.п.}$ и полиакриламида $K_п$ оставляли соответственно 8–10 % и 10^{-6}–10^{-2} % от общего объема рабочей жидкости. Предварительная подготовка речного песка по фракционному составу осуществлялось в устройстве гравитационного типа.

На втором этапе РСО использовалась чистая вода, подаваемая насосами на обрабатываемую поверхность, для полной промывки ее от мелкодисперсных фракций речного песка, что необходимо для проведения третьего этапа очистки.

На третьем этапе осуществления РСО использовалась рабочая жидкость, содержащая воду, в которой были размешаны бентонитовая глина и кальцинированная сода с концентрациями соответственно $K_б$ = 5–20 % и $K_{к.с.}$ = 2–10 % от общего объема. Эти концентрации после эжектирования в струйном сопле снижались в струе, действующей на обрабатываемую поверхность, до значений $K_{б,с}$ = 2–5 % и $K_{к.с.с}$ = 0,2–1,0 % и являлись оптимальными при подготовке поверхности под ЛР.

Отличительным моментом реализации третьего этапа РСО является операция сушки образцов при комнатной температуре (T = 20 ^{0}С) в течение 20–24 ч. Эта операция позволяет сформировать на обработанной поверхности за счет заполнения впадин микронеровностей антикоррозионный защитный слой с толщиной δ, составляющий не менее 1,1–1,2 от максимальной высоты выступов микронеровностей $R_{a,max}$ ($\delta > 1{,}1–1{,}2\ R_{a,max}$).

Апробация разработанной технологии РСО проводилась на опытном участке в ОАО «Слуцкий сахарорафинадный комбинат» на установке «КАМАТ К415А-Е45В» (ФРГ) (рисунок 1), способной развивать давления на входе в сопло $p_с$ = 63–120 МПа, что обеспечивало скорости струи на выходе из сопла $\upsilon_{стр}$ = 350–550 м/с.

Рисунок 1 – Установка «КАМАТ К415А-Е45В» (ФРГ), где проводилась апробация разработанной технологии РСО

В ходе проведенных исследований экспериментально установлены оптимальные режимы очистки: расстояние от сопла до очищаемой поверхности L = 15–60 мм, скорость струи $\upsilon_{стр}$=150–200 м/с, давление $p_с$ = 18–23 МПа.

УДК 531.781.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЕРХНЕЙ ОЦЕНКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СКОРОСТНОГО, КОМБИНИРОВАННОГО, ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДОРОЖНЫХ РЕЗЦОВ

Быков К. Ю., Качанов И. В., Шаталов И. М., Ленкевич С. А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

На сегодняшний день использование наукоемких технологий обработки материалов, обеспечивающих снижение энерго- и ресурсозатрат, с одновременным повышением физико-механических и эксплуатационных свойств получаемых изделий, является основополагающим фактором в развитии промышленного производства.

В этой связи, технологии, основанные на высоких скоростях деформации, такие как скоростное, комбинированное, горячее выдавливание (СКГВ) обладают большими возможностями. Одним из преимуществ СКГВ является возможность за один удар получать высокоточные, неразъемные биметаллические формообразующие детали с экономией штамповых сталей до 90 %. Однако, отсутствие корректной теории, описывающей силовой режим работы инструмента, сдерживает широкое развитие этого процесса.

Реализация процесса СКГВ дорожных резцов заключается в скоростном деформировании предварительно нагретых составных заготовок. Для теоретического исследования процесса необходимо разработать модель динамического взаимодействия системы «пуансон – деформируемая заготовка».

При решении задач подобного типа целесообразно использовать приближенный энергетический метод (метод верхней оценки). Преимущества этого метода состоят в том, что он позволяет учесть ряд динамических явлений, возникающих при взаимодействии пуансона с заготовкой, кинематику процесса, провести анализ нестационарного нагружения с учетом стадий процесса и получить решение в замкнутой аналитической форме.

Суть метода заключается в использовании кинематически возможного поля скоростей с несколькими варьируемыми параметрами. Определение значений варьируемых параметров основывается на условии минимума мощности внутренних сил.

Поскольку принцип решения задачи определяется условием минимальной мощности внутренних сил, устанавливаемой с использованием оптимальных параметров поля скоростей, получаемые зависимости вполне могут использоваться для расчетов при разработке промышленной технологии скоростного, комбинированного, горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов.

УДК 621

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В АСКУЭ

Гутич И.И., Коваленко Е.А.
Белорусский Национальный Технический Университет
Минск, Республика Беларусь

Беспроводные самоорганизующиеся сети – это децентрализованные сети без постоянной структуры. Каждый узел сети пытается переслать данные, которые предназначены другим узлам. Определение того, какому узлу пересылать данные, производится динамически, на основании связности сети. Это отличает данную сеть от проводных и управляемых беспроводных, в которых задачу управления потоками данных выполняют маршрутизаторы (в проводных сетях) или точки доступа (в управляемых беспроводных сетях). Суть самоорганизующихся сетей заключается в предоставлении абоненту возможности доступа к широкому спектру сетевых услуг посредством передачи и приёма «своего» трафика через соседних абонентов.

В настоящее время существует несколько технологий используемых для построения беспроводных самоорганизующихся сетей. Самые популярные, используемые в АСКУЭ: Bluetooth, Wi-Fi 802.11, ZigBee™.

Bluetooth начал разрабатываться как беспроводная альтернатива для кабельного интерфейса RS-232 в компании Ericsson в 1994 году. В 2002 году был опубликован стандарт IEEE802.15.1 в который, на основании соглашения между Bluetooth SIG и IEEE, вошла спецификация Bluetooth.

Особенности: в настоящее время технология представлена различными версиями (от 1.0 до 5.2) и скоростными диапазонами (1…5 Мбит/с). Причём достижение высоких скоростей последних версий стало возможным не за счёт архитектуры построения беспроводной «ad-hoc» сети, а за счёт функции «colocation» (две в одном устройстве), реализуемой совместно с другими технологиями, например, совместно с Wi-Fi или UWB.

Wi-Fi – общее название для беспроводных сетей на базе стандарта IEEE802.11. Wi-Fi был создан в 1991 году NCR Corporation/AT&T в Нидерландах. В 2009 году был утвержден стандарт IEEE802.11n, в котором теоретически возможная скорость достигает 600 Мбит/сек. Основное преимущество Wi-Fi – широкая распространенность и низкий уровень излучения в момент передачи данных, порядка 100 мВт. К недостаткам относится низкая скорость передачи в режиме точка-точка (не более 11 Мбит/сек), а также то, что устройства данного стандарта работают в диапазоне ISM (2.4 ГГц), который массово используется для работы множество других различных устройств, вплоть до микроволновых печей, что неблагоприятно сказывается на электромагнитной совместимости.

УДК 681.5.01

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНЖЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ LE-JETRONIC

Чаплыгин Д.Ю., Околов А.Р.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

"Микроконтроллерный электронный блок управления для инжекторной системы le-jetronic" является востребованным на рынке, так как на сегодняшний день по дорогам перемещается большое количество устаревших автомобилей с подобной системой. Замена блока управления и ДМРВ (датчика массового расхода воздуха) на современные позволит поднять мощностные и экологические показания автомобиля.

Целью работы является изучение электронных распределенных систем впрыска топлива и разработка собственного блока управления, который будет возможно мелкосерийно изготавливать.

Система распределенного впрыска LE-Jetronic[1] является системой импульсного впрыска с электронным управлением количественным и качественным составом топливно-воздушной смеси. Для обеспечения импульсного впрыска топлива в системе применены форсунки с электромагнитным управлением.

В сравнении с системами K-Jetronic и KE-Jetronic, импульсный впрыск, реализованный в системе LE-Jetronic, обеспечивает топливную экономичность, снижение токсичности отработавших газов и улучшение динамических характеристик автомобиля.

Конструкция системы впрыска LE-Jetronic включает распределительную магистраль, форсунки впрыска, регулятор давления топлива, расходомер воздуха, пусковую форсунку, клапан добавочного воздуха, а также обязательные элементы электронного управления - входные датчики и блок управления.

Основным недостатком оригинальной системы является ДМРВ (датчик массового расхода воздуха). Конструктивно он представляет собой подпружиненную заслонку. Жесткость пружины настраивается под конкретный двигатель для получения более-менее точных данных. Преобразование угла поворота заслонкой происходит при помощи переменного потенциометра, т.к. это механика, а этим ДМРВ уже больше 20-30 лет, дорожки потенциометра изношены очень сильно и не дают нормальных значений, что приводит к неправильному смесеобразованию. Из-за неправильной топливной смеси происходит перерасход топлива, низкие мощностные и экологические показатели. Так же, при резком открытии дросселя из-за инерционности заслонки дмрв, она в первый 0.5-1.0 секунды открывается слишком сильно и ЭБУ (Электронный блок

управления) открывает форсунки на слишком длительный период, что приводит к переобогащению смеси.

Вторым недостаток системы является ЭБУ (Электронный блок управления). Он аналоговый, следовательно, не поддерживает каких-либо настроек, которые можно сделать на микроконтроллерном ЭБУ. Также, из-за аналогового принципа, выход любого вспомогательного датчика из строя приводит к неработоспособности системы.

Существуют готовые решения блоков управления с современным ДМРВ и онлайн настройкой, например: Январь, MegaSquirt. Их основными недостатками являются:

1. необходимость купить не только ЭБУ, но и большое количество других деталей;
2. необходимость сильно переделывать проводку автомобиля;
3. высокая стоимость.

Главной целью разработки данного электронного блока управления (ЭБУ) стало желание создать систему, которую очень легко внедрить в авто.

Для установки ECU_Maslinolovic необходимо: заменить старый ЭБУУ на новый (разъемы совпадают) и заменить датчик массового воздуха (ДМРВ) на современный пленочный.

В качестве главного вычислительного устройства был выбрал микроконтроллер **STM32 F103RCT6**[2], т.к. он имеет высокую тактовую частоту (до 72 МГц), большое количество портов ввода/вывода (корпус LQFP 64), большое количество памяти для загрузки прошивки (256 кБ).

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЯВЛЯЕМЫЕ К БЛОКУ УПРАВЛЕНИЯ:

4. поддержка любых современных пленочных ДМРВ (Датчиков массового расхода воздуха);
5. управление форсунками одновременно, попарно, поочередно;
6. управление системой зажигания;
7. возможность установки датчиков детонации;
8. возможность установки лямбда-зонда;
9. онлайн настройка;
10. минимальные изменения в схемотехнике автомобиля.

1. L-Jetronic Fuel Injection Systems for BMW E12’s [Электронный ресурс]. – http://www.firstfives.org/faq/ljet/jetronic.pdf – Дата доступа: 07.03.2020.
2. STM32F102 Reference manual [Электронный ресурс]. – :https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00171190-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf – Дата доступа: 05.04.2020.

УДК 62-83-52(075.32)

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ В КАНАЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Опейко О.Ф.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Качество системы управления зависит от достоверности информации о состоянии объекта, получаемой по каналам обратных связей, которые, однако, подвержены помехам.

Система электропривода имеет обратную связь по скорости от инкрементального датчика положения (энкодера), получаемую дискретным дифференцированием. При уменьшении скорости, ввиду увеличения интервала времени между импульсами датчика, запаздывание определения скорости и погрешность увеличиваются.

Возможны два варианта расчета параметров пропорционально интегрирующего (ПИ) регулятора скорости в условиях изменения частоты импульсов в канале ОС по скорости. В первом варианте ПИ- регулятор адаптируется к изменению периода импульсов. Во втором - ПИ- регулятор робастный и рассчитан на весь диапазон изменений скорости.

ПИ- регулятор с передаточной функцией (ПФ)

$$K(z)=k_P+k_I\frac{T_C z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

имеет коэффициенты k_P и k_I усиления пропорциональной и интегрирующей частей, $z^{-1}=\exp(-T_C s)$ соответствует запаздыванию на время T_C, формирования сигнала управления. Коэффициенты k_P и k_I следует рассчитывать так, чтобы характеристический полином замкнутого контура скорости имел заданные корни.

Учитывая, что контур регулирования тока практически безынерционен, характеристический полином контура скорости с ПИ-регулятором и дискретной ПФ объекта $k_M J^{-1}(1-z^{-1})^{-1}$ принимает вид

$$N(z)=(z^2-1)+(k_P(z-1)+k_I T_C)T_C k_M J^{-1}=z^2-(2-k_P T_C k_M J^{-1})z+k_I T_C^2 k_M J^{-1}.$$

Здесь k_M, - коэффициент пропорциональности между моментом и током, J - момент инерции. Чтобы корни полинома имели значения $z_{1,2}=\exp(T_C(-\alpha\pm j\beta))$, где $\alpha=3/t_0$ определяется в зависимости от требуемого времени регулирования t_0, при $\beta=0$ параметры регулятора следует определить по выражениям

$$k_P = 2\cdot(1-d)\cdot T_C^{-1}k_M^{-1},\ \ k_I = d^2 T_C^{-2}k_M^{-1}J \qquad (1)$$

Здесь $d = \exp(-T_C\alpha)$. При малых значениях T_C справедливо приближенное выражение $d \approx 1 - T_C\alpha$, и на основании (1) получаются приближенные выражения

$$k_P = 2\cdot\alpha\cdot k_M^{-1},\ \ k_I = (1-\alpha T_C)^2 T_C^{-2}k_M^{-1}J. \qquad (2)$$

Из (2) видно, что при малых T_C от T_C зависит только параметр k_I, возрастая с уменьшением T_C. Следовательно, выбор для расчета заниженных значений T_C приведет к возрастанию колебаний.

В случае квадратурного счета событий от датчика с N делениями на один оборот угловое деление равно

$$\Delta = 2\pi\ /\ (4N)\ \textit{рад.}$$

При скорости ω период T_N событий определяется выражением $T_N = \Delta / \omega$, и на низких скоростях $\omega \le \omega_* = \Delta / T_S$ может превосходить период T_S расчета сигнала управления в микроконтроллере управления электроприводом. Поэтому в выражениях (1) интервал дискретности рекомендуется принимать равным $T_C = \max[T_S, T_N]$ во избежание потери устойчивости и качества.

В первом варианте на каждом шаге расчета управления при низких скоростях $\omega \le \omega_*$ параметры (1) должны заново рассчитываться в зависимости от изменившегося значения $T_C = T_N = \Delta / \omega$.

Во втором варианте расчета управления при низких скоростях $\omega \le \omega_*$ параметры (1) постоянны и рассчитываются для наименьшего значения скорости из диапазона, $T_C = T_{N\max} = \Delta / \omega_{\min}$, когда имеет место наибольшее запаздывание $T_{N\max}$.

Например, при N=112, $T_S = 0{,}0005\,c$, $\omega_* = \Delta / T_S = 28$ *рад/с,* и при $\omega_{\min} = 5$ *рад/с* расчетное значение T_C для (1) определяется в виде $T_C = T_{N\max} = \Delta / \omega_{\min} = 0{,}0028$ *с.*

Адаптивный ПИ- регулятор позволяет сохранить показатели качества при изменении интервала дискретности.

Преимущество робастного регулятора заключается в постоянстве параметров регулятора и наличии значительного запаса устойчивости, однако такой регулятор не использует возможное при высоких скоростях быстродействие.

УДК 681.518.3

АВТОМАТИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ

Липницкий Л.А.[1], Шалькевич П.К.[1], Пильгун Т.В.[2]
1).Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета
2) Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Безопасность движения на железнодорожном транспорте определяется множеством факторов, среди которых основные – техническое состояние подвижного состава, пути, устройств управления движением, соблюдение исполнительской дисциплины работниками, недостаточная автоматизация процессов управления движением. Современные системы автоматического управления движением железнодорожного транспорта не исключают возникновения конфликтных ситуаций, при которых предусматривается введение диспетчерского управления в целях предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения безопасности движения.

Одним из наиболее опасными с точки зрения возникновения конфликтных ситуаций на железнодорожном транспорте являются железнодорожные переезды, расположенные на одном уровне с другими коммуникациями передвижений: автомобильным транспортом, пешеходными переходами, перегоном скота. Являясь наиболее опасным местом, требующим особого внимания, железнодорожные переезды требуют прежде всего соблюдения правил дорожного движения. Не смотря на наличие на переезде знаков, разметки, заградительных устройств, звукового оповещения, светофорного регулирования и автоматических шлагбаумов, наличие которых направлено на предотвращение возможного столкновения поезда с препятствиями, периодически случаются аварийные ситуации, многие из которых связаны с человеческими жертвами и большими материальными потерями, а также с нарушением движения железнодорожного и транспортного сообщения. Анализ ситуации показывает, что в настоящее время ситуация с соблюдениями правил безопасности на всех видах одноуровневых железнодорожных переездов остается неудовлетворительной.

По данным 31-ой страны, собранным в отчете Международного союза железных дорог (МСЖД), за 2019 г. доля происшествий на железнодорожных переездах составила 12,9% от общего количества происшествий. При этом число погибших в результате инцидентов, связанных со столкновением транспортных средств на переездах, составило 337 чел. или 14,7% от общего количества погибших (2285 чел.) на железных дорогах [1]. Статистика несчастных случаев на переездах приведена на рисунке 1. За период 2014-2018 годов количество

происшествий на переездах составила 21,2%. Очевидна тенденция стабилизации числа происшествий на регулируемых переездах с 2016 года (верхняя линия). Тенденция снижения аварийности на нерегулируемых переездах (нижняя линия) объясняется уменьшением их числа.

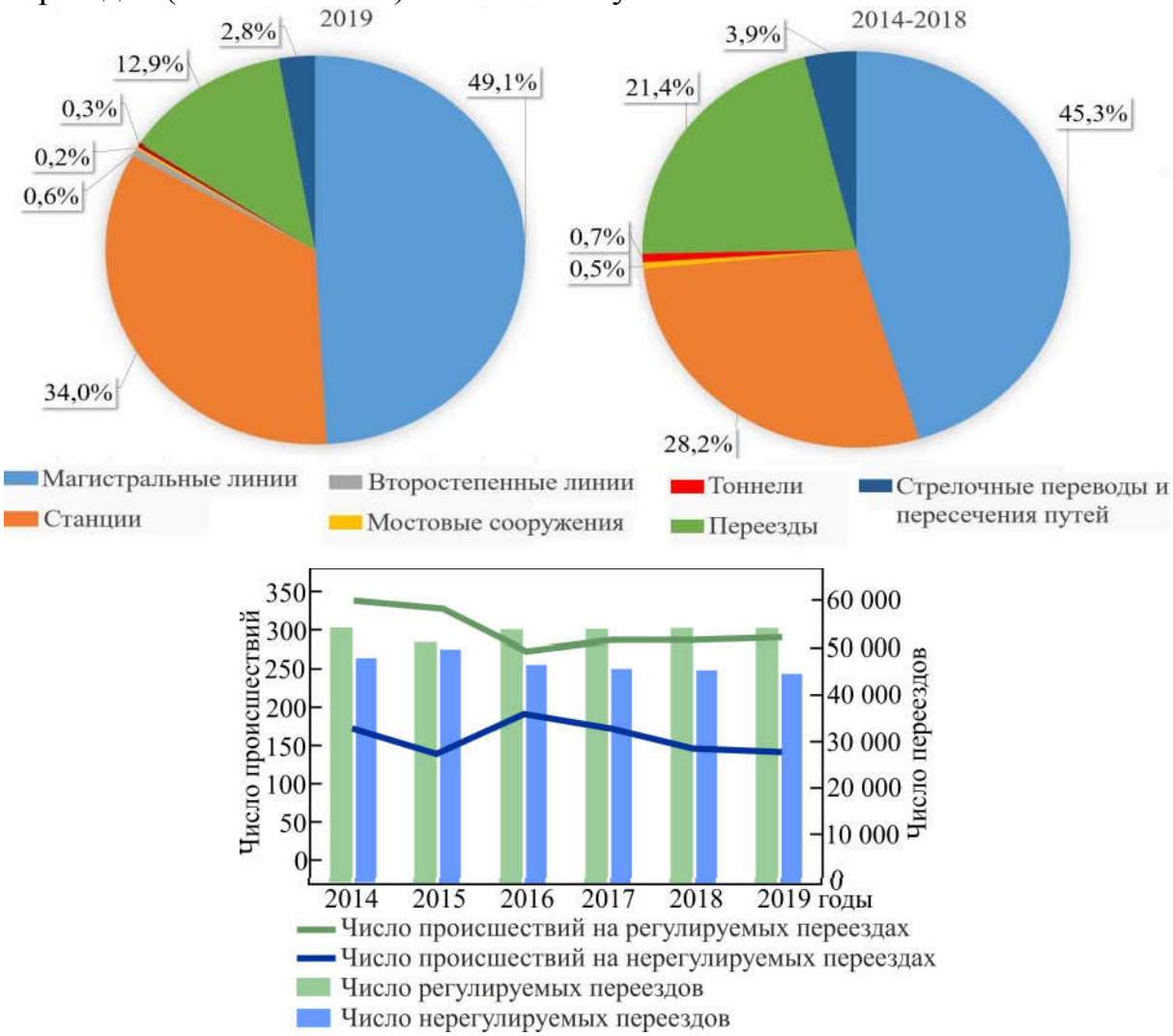


Рисунок 1 – Статистика несчастных случаев на железнодорожных переездах (материалы отчета МСЖД, UIC Safety Report 2020)

Таким образом, большинство причин совершаемых нарушений правил безопасности на переездах связано со столкновением поездов с автомобильным транспортом. Данная ситуация возникает из-за того, что некоторые водители идут на нарушения правил дорожного движения, не учитывая то, что поезда, имея огромную массу, не могут резко снизить скорость и затормозить, Их тормозной путь составляет более 1000 км. Другим частым случаем данного типа происшествий является то, что автомобили глохнут или ломаются на железнодорожном переезде и не в состоянии самостоятельно покинуть переезд.

Решением указанных случаев могли бы служить системы автоматического контроля и предотвращения аварийных ситуаций. Данная система должна включать электронную систему слежения, основанную на использовании спутниковых систем наблюдения, позволяющая выявить

наличие посторонних объектов (автомобилей, людей, животных) на железнодорожном переезде, подачу световых и звуковых сигналов как на диспетчерские пункты, так и в кабину машиниста поезда о наличии препятствия на железнодорожных путях с целью своевременного снижения скорости и возможности своевременной остановки состава перед препятствием на переезде. Причем момент начала снижения скорости должен обеспечиваться своевременным восприятием и передачей несанкционированного нахождения автомобиля на переезде информации в кабину машиниста и на локомотивное устройство автоматической системы безопасности, которое способно на основе выполненных расчетов определить момент включения тормозной системы поезда. Дополнительно с этим автоматическая система переезда может включать световую и звуковую сигнализацию на самом переезде, что позволит дополнительно предупредить, как приближающиеся железнодорожные составы о аварийной ситуации, так и тех, кто непосредственно находится на переезде или вблизи него с целью скорейшей ликвидации затора на путях.

Для обеспечения своевременного снижения скорости в автоматической системе безопасности локомотива должна быть встроена автоматическая система контроля скорости движения, которая с учетом геоцифровых карт профиля железнодорожного пути и системы спутниковой навигации автоматически выполняла необходимый расчет и снижала скорость поезда за 400-500 м до переезда до безопасного значения, которое бы позволило машинисту при получении сигнала о наличии помех для движения через переезд принять решение о полной остановке поезда при необходимости.

Необходимыми мерами, позволяющими обеспечить работоспособность автоматизированной системы безопасности, являются системы видеонаблюдения на железнодорожном переезде и система автоматического освещения переезда, которая позволяет включать освещение в случаях, если естественное освещение ниже требуемого уровня и, если в районе поезда появляются движущиеся объекты или на путях находятся посторонние объекты, препятствующие движению поезда.

Проведенный анализ показывает на наличие в системе безопасности на железнодорожном транспорте недостаточности мер безопасности, используемых на переездах. Применение предлагаемой системы автоматического контроля и предотвращения аварийных ситуаций позволить существенно повлиять на безопасность движения на железнодорожных переездах, сведя к минимуму травматизм и материальные потери.

1. МСЖД: статистика происшествий на железных дорогах // Материалы отчета Международного союза железных дорог. – Железные дороги мира – 2020, № 1. – С. 21-24.

УДК 621.9.06-529

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ/ВЫГРУЗКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН СО СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ

Лившиц Ю.Е., Буйко К.С.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь.

Прежде чем автомобильная шина отправляется в массовое производство, она проходит многочисленные испытания. Для этого используются разнообразные стенды испытаний. Они позволяют определить как статические параметры шины (размеры, вес, прочность и т.д.), так и оценить поведение шины в условиях, максимально приближённых к реальности.

Стенды испытаний для автомобильных шин, как правило, разрабатываются для конкретных клиентов с учётом всех необходимых именно этому клиенту параметров. Следовательно, они бывают самых разнообразных конструкций и назначений. Однако, у всех их есть главный минус – не предусмотрена автоматическая установка и снятие шины со стенда. Это представляет определённую сложность из-за габаритов и веса шины, что приводит к увеличению времени цикла контроля, а также может привести к производственной травме человека-оператора.

С целью исправления этого недостатка, предлагается использовать роботизированный комплекс испытания автомобильных шин на основе испытательного стенда. Конструктивное исполнение стенда роли не играет, так как планируется использование робота-манипулятора с 6-ю степенями подвижности. Наиболее предпочтительным для этой задачи является промышленный робот Kawasaki BX100L. Он обладает грузоподъемностью до 100 кг, что хватит для перемещения любой шины. Язык программирования робота понятен и доступен для изучения. Оптимальным является и сочетание цена/качества. Важным фактором является гибкость и простота встраивания робота в уже существующие технологические решения.

Для управления комплексом использован промышленный логический контролер Delta Electronics DVP-ES. Данные контролеры обладают большим количеством высокоскоростных портов, производительным процессором, поддерживают большое количество инструкций и при этом обладают низкой стоимостью.

В качестве протокола соединения технологического оборудования выбран протокол промышленный Ethernet. На данный момент, это самый популярный, который поддерживается практически всеми устройствами и оборудованием. Главные преимущества выбранного протокола – легкость установки, надежность, скорость и безопасность.

УДК 658.512.22.011.56

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ ДОСТИЖИМИОСТИ МАНИПУЛЯТОРА РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS WB

Напрасников В.В. [1], Полозков Ю.В. [1],
Соловьев А Н. [2], Скалиух А.С. [3]

1) Минск, Белорусский национальный технический университет
2)Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет
3)Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет

При проектировании промышленных роботов одной из актуальных задач является построение области достижимости манипулятора для оценки эффективности создаваемой конструкции. Построение аналитической модели с учетом кинематики всех звеньев и шарнирных сочленений компонентов конструкции является сложной задачей, требующей существенных временных затрат.

С другой стороны, расчет напряженно-деформированного состояния такой конструкции предполагает по предварительное создание геометрической части конечно-элементной модели. Эту часть работы можно продуктивно использовать для построения перемещений всех частей конструкции как жесткого целого без учета деформирования этих частей с использованием специализированного инструмента, встроенного в пакет ANSYS WB.

Такой подход позволяет на основе задания движения в шарнирах, соединяющих части манипулятора, визуализировать перемещения конструкции в целом, что существенно облегчает задачу анализа эффективности этого объекта.

В качестве примера использования такого подхода рассматривается конструкция манипулятора, представленная на рисунке 1. Здесь жесткие звенья соединяются посредством шарниров, пример контактной пары которых представлен на рисунке 2. На рисунке 3 представлен пример настройки для закона изменения угла поворота в одном из шарниров.

На рисунке 4 показаны положения конструкции в различные моменты времени.

В ходе проделанной работы:

- построена конечно-элементная и твердотельная модель манипулятора робота;
- получены результаты визуализации движения конструкции при заданных законах движения в шарнирах, позволяющие оценить область достижимости для данного проекта конструкции;
- предлагаемый подход позволяет одновременно выполнять расчет напряженно-деформированного состояния конструкции и оценивать ее эффективность по области достижимости.

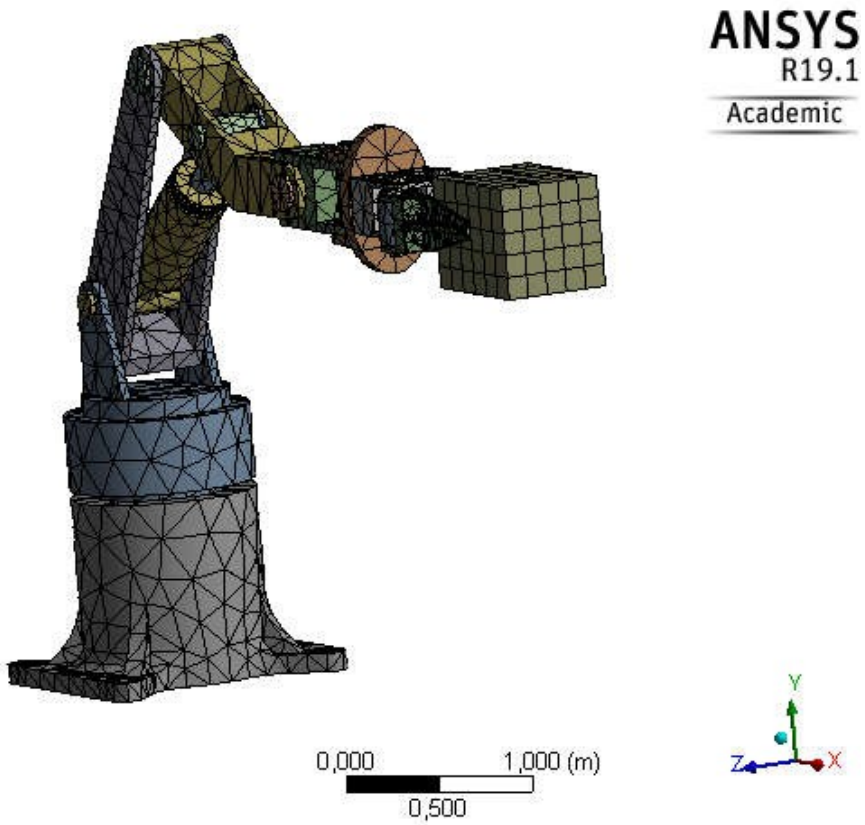


Рисунок 1. Конструкция манипулятора с нанесенной сеткой

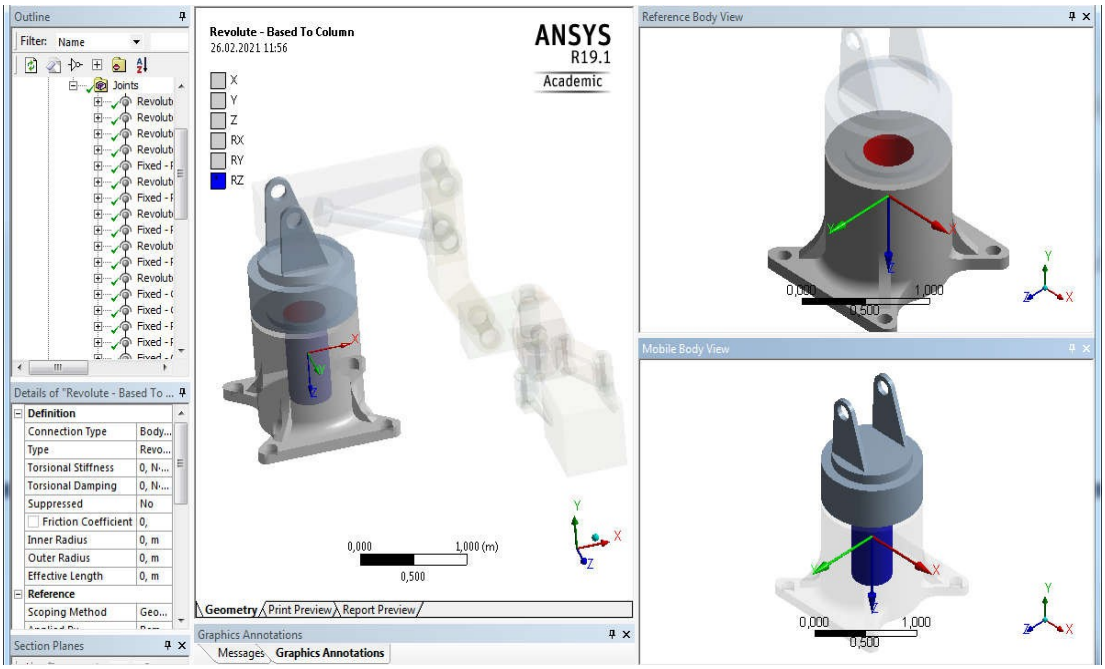
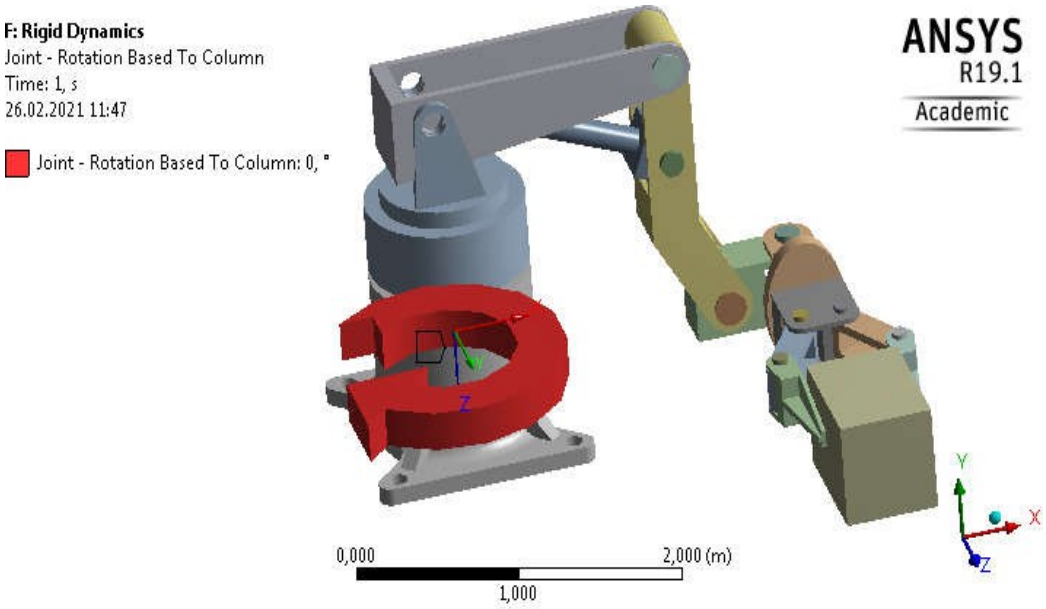


Рисунок 2. Пример контактной пары



Риунок 3. Пример настройки для закона изменения угла поворота

На рисунке 4 показаны положения конструкции в различные моменты времени.

Рисунок 4. Положения конструкции в различные моменты времени

УДК 621.311.1

ДВУХУРОВНЕВАЯ АСКУЭ ДЛЯ ЖИЛОГО СЕКТОРА

Гутич И.И., Задорожная В.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь.

Главная автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), в жилых домах и поселках ставит цель - не полностью сэкономить время и силы контролера, а снизить потери и остановить хищение энергии.

Стоимость АСКУЭ для жилых домов должна быть чрезвычайно низкой, иначе полученная экономия не окупит затраты на создание и эксплуатацию системы учета [1].

Цена АСКУЭ для жилищного сектора является определяющим фактором. Создание системы позволяет относительно небольшую экономию на каждой точке счетчика - несколько десятков рублей в месяц. Поэтому затраты на установку и эксплуатацию АСКУЭ не должны превышать достаточно жесткого лимита. Следующий важный момент - это функциональность АСКУЭ. Если системы промышленных потребителей регулируются различными правовыми актами и правительственными документами, то АСКУЭ домашних потребителей оставляет много места для «творчества». Очень важно найти баланс между функциональностью, ценой и надежностью АСКУЭ.

К техническим средствам АСКУЭ жилого сектора относятся трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, электросчетчики, УСПД, локальные блоки сбора данных, сервер, средства телекоммуникации (связывают счетчики с УСПД и УСПД с сервером), устройства контроля показателей качества электроэнергии.

Классической считается трехуровневая схема:

1. нижний уровень (измерительный комплекс приборов для учета электроэнергии) передает данные о потоках энергии;
2. средний уровень (маршрутизатор/УСПД) опрашивает счетчики, группирует данные и пакетами пересылает их наверх;
3. верхний уровень (сервер) обеспечивает сбор, хранение и обработку данных, а также решение прикладных задач.

Однако все большее распространение получают двухуровневые АСКУЭ, в которых счетчики напрямую подключаются к серверу. Возможны и «два с половиной уровня» решения. В них часть функций УСПД берет на себя «интеллектуальный» счетчик или верхний уровень, либо сервер и счетчики подключаются не через УСПД, а к более простому и компактному устройству – коммуникатору [2].

АСКУЭ для жилых домов отличается большим количеством точек замера, и связывать каждый счетчик с верхним уровнем отдельной линией достаточно дорого. Обычно счетчики подключаются к УСПД через канал

PLC (передача данных по проводам электрической сети) или через радиосеть ZigBee. Ну, а на верхнем уровне информация передается от УСПД по любой технологии дальнего действия - GSM / GPRS или радиосигнал в другом формате (рис. 1). Использование PLC для прямого подключения счетчика к верхнему уровню невозможно из-за достаточно быстрого затухания сигнала в электрических сетях.

Рисунок 1 – Пример двухуровневой АСКУЭ компании «Энергосфера»

Однако бытует мнение, что именно для муниципального АСКУЭ двухуровневая схема - грамотное техническое решение. За довольно короткое время, за неделю, верхний уровень может опросить несколько тысяч счетчиков, и этой эффективности вполне достаточно. Что касается возможности подключения, могут быть различия в технических решениях и стоимости.

1. Ожегов А.Н. / Системы АСКУЭ – Киров: ВятГУ, 2006. – 102 с.
2. Гуртовцев А. "Комплексная автоматизация энергоучета на промышленных предприятиях и хозяйственных объектах" – журнал "СТА" №3, 1999 г. – с.44-45

УДК 004.5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОНЛАЙН-ШКОЛОЙ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Здончик Д.И., Гутич И.И.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время существует множество систем управления учебным процессом. Основными задачами любой из них являются структуризация учебного процесса, возможность составлять расписание занятий учеников и преподавателей, хранение информации об учениках. Некоторые из них имеют более широкие возможности, такие как внесение оплаты за занятие или возможность корректировать расписание из личного кабинета.

Целью проекта является разработка веб-приложения для онлайн-школы программирования в качестве замены имеющейся системы управления учебным центром.

Целью построения модели предметной области является графическое представление предметной области. Модель предметной области показывает сущности и взаимоотношения между ними. Модель предметной области представлена в виде диаграммы сущность-связь. Разберем связи между пользователями системы:

а) пользователь. Каждый пользователь имеет такие атрибуты, как контактные данные, фамилию, имя и отчество;

б) четыре типа пользователей: родитель, ученик, менеджер и преподаватель;

в) семья, включающая в себя одного или несколько учеников, а также родителей ученика. Для идентификации семьи используется атрибут Фамилия.

Рассмотрим каждый тип пользователя отдельно:

а) преподаватель. Ведет занятия, может самостоятельно указывать себе направления, которые способен вести. К каждому преподавателю привязывается одна или несколько групп, содержащих в себе до шести учеников;

б) менеджер. Задача менеджера - поддержка обратной связи с учениками и родителями учеников. Контроль включает в себя проверку посещения занятий и своевременного внесения оплаты за обучение. Не имеет дополнительных атрибутов;

в) ученик. Обучается в школе. Может проходить обучение по одному из направлений школы;

г) родитель. Оплачивает занятия ученика.

Возможности пользователя в системе зависят от типа пользователя. Если ученики могут контролировать только те занятия, которые они посещают, то менеджер может перенести занятие любого ученика.

УДК 631.171: 681.518.3

ОЦЕНКА МАССЫ КОРОВЫ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТИ

Немирович С.И., Сеньков А.Г.
Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Измерение массы и оценка упитанности дойных коров очень важны в работе с дойным стадом крупного рогатого скота. Индекс упитанности является показателем состояния здоровья, условий содержания и кормления животных. С развитием современных цифровых технологий и интеллектуальных методов управления европейские фирмы-производители оборудования для молочно-товарных ферм предлагают новые автоматизированные системы оценки упитанности и массы коров, основанные на получении и обработке двух- и трехмерных изображений животного [1]. Подобная автоматизированная система самостоятельно, без каких-либо усилий со стороны фермера, предоставляет систематические, ежедневные данные о состоянии стада.

Первым шагом при оценке массы коровы является сегментация полученного фотоизображения и автоматическое выделение не нам контуров тела животного. Для решения этой задачи предложено использовать современные нейросетевые программные алгоритмы сегментации на основе сверточных нейронных сетей [2]. Результат применения указанных алгоритмов, реализованных в программной библиотеке TenzorFlow [3], представлен на рис. 1.

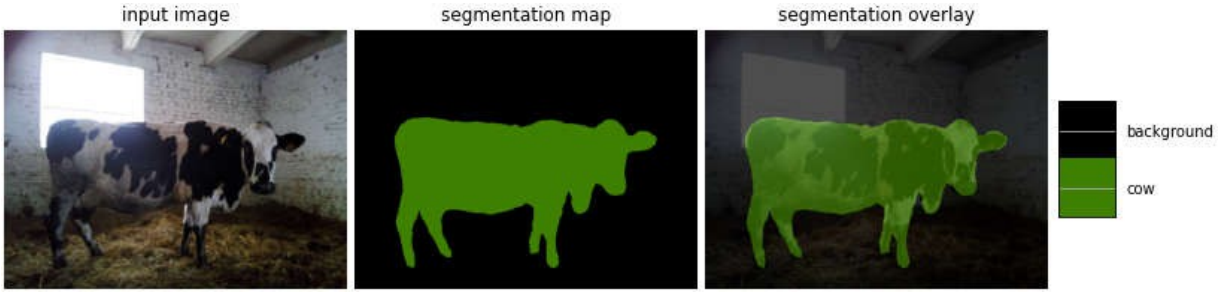


Рисунок 2 – Выделение контуров коровы на изображении

Массу m коровы предлагается определять как функцию нескольких измеряемых по полученным изображениям параметров l_1, l_2, …:

$$m = f\left(l_1, l_2, \ldots\right), \tag{1}$$

где конкретный вид функции $f\left(\ldots\right)$ для всей породы в целом определяется в виде нейронной сети на основе обработки статистических данных [2].

В данной работе для черно-пестрой породы коров предлагается использовать следующее уравнение регрессии:

$$m = 3.31x + 1.62y, \tag{2}$$

где m – масса коровы, кг; x – длина коровы, см; y – боковая высота коровы, см.

Для оценки размеров тела коровы x и y по полученному бинаризованному изображению в данной работе используется программный алгоритм на основе вейвлет-преобразования. В начале находятся значимые линии, затем точки координат пересечения линий. Результат работы алгоритма представлен на рис. 2.

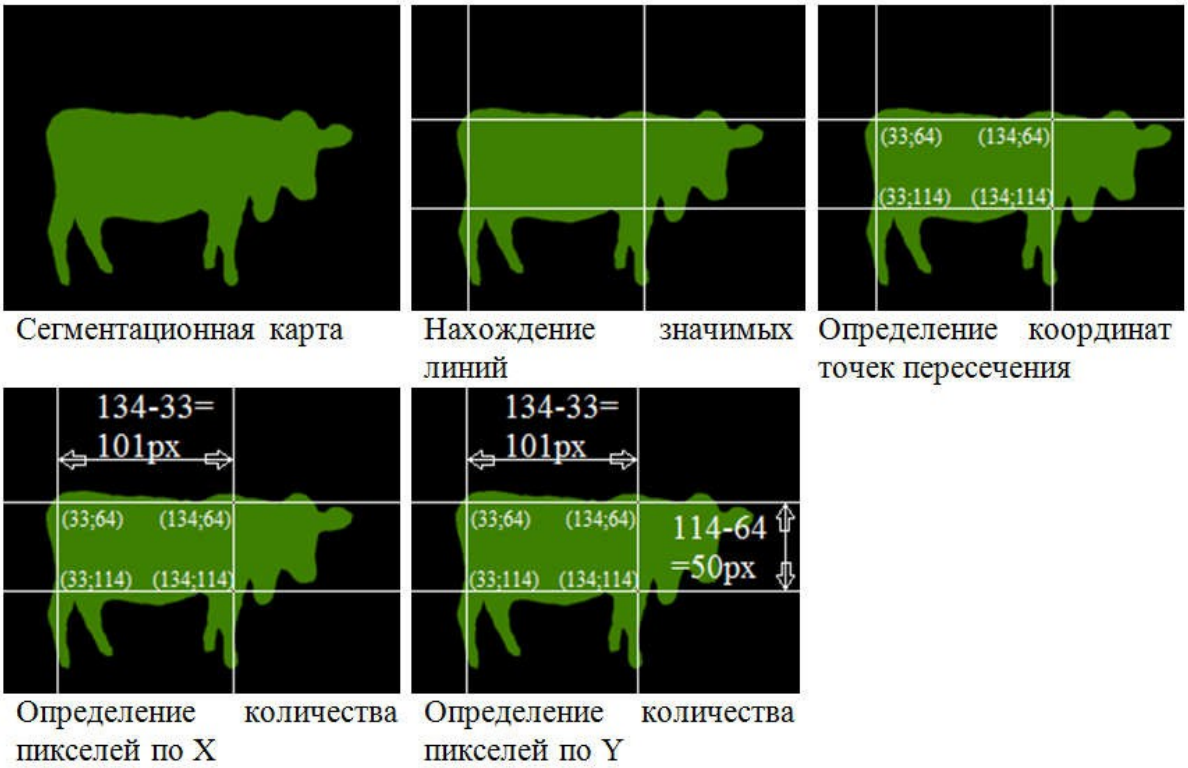


Рисунок 2 – Программное определение размеров тела коровы

Для получения более высокой точности определения массы необходимо учитывать в уравнении регрессии ширину туловища коровы, для чего потребуется использовать дополнительную фотокамеру для получения изображений коровы сверху.

1. D-Scanner / [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www2.hs-fulda.de/caelabor/inhalte/grundlagen/3D-Scanner_Sippel_Lorei.pdf. Дата доступа – 22.04.2018.
2. Нейронные сети в Matlab. Аппроксимация функций / [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://gr1g0ry.blogspot.com/2010/06/blog-post_15.html. Дата доступа – 10.09.2019.
3. Шакла, Н. Машинное обучение и TensorFlow. – СПб.: Питер, 2019. – 336 с.

УДК 621.32

ПРИНЦИПЫ ТАРИФНОЙ ПОЛИТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Сычёва Д.А., Гутич И.И., Реентович И.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Каждый житель Беларуси обязан производить оплату за потребляемую электроэнергию не позднее 25 числа месяца, который следует за расчётным периодом. Если оплата не была произведена до 26 числа, то сумма автоматически приобретает статус задолженности. При задолженности платежа за каждый день просрочки взимается пеня в размере 0,3% от суммы платежей, которые не были вовремя оплачены.

Расчётным периодом считается календарный месяц, а оплата производится за установленный расход.

Тарифы, а также нормы оплаты электроэнергии устанавливаются на основании Постановлений Совета Министров .

Тарифы на электроэнергию пересматриваются примерно раз в полгода на основании:

- роста потребления электроэнергии;
- увеличения или снижения цен на электроэнергию.

Нормы расхода зависят от [1]:

- числа жителей;
- наличия счётчика;
- наличия электрической плиты;
- времени использования.

Также следует отметить, что в Беларуси существует 3 тарифа:

- по объёму потребления;
- по двум временным периодам;
- по трём временным периодам.

С начала года правительство повысило тарифы по объёму потребления. Теперь не учитывается количество человек, проживающих в квартире или жилом доме, а также сколько кВт·ч проживающий потребил. Все платят по единому тарифу – 0,1778 кВт·ч.

Субсидируемые тарифы для населения будут применяться для расчетов за электроэнергию, потребленную в жилых помещениях (квартирах) многоквартирных жилых домах, оборудованных в установленном порядке системами централизованного теплоснабжения на цели отопления и газоснабжения на цели пищеприготовления и не оборудованных в установленном порядке электрическими плитами, системами централизованного горячего водоснабжения и индивидуальными газовыми водонагревателями.

УДК 004.023

ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТА БЛА ПРИ ВНЕСЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Сеньков А.Г.
Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в земледелии и в целом в сельском хозяйстве – одно из наиболее перспективных направлений применения этой технологии. Особенно полезно применение БЛА в современном точном земледелии для оперативного мониторинга развития выращиваемых сельскохозяйственных культур, точечного внесения удобрений и средств защиты растений (СЗР). При этом масса полезной нагрузки – удобрений, СЗР и оборудования для их внесения – обычно составляет 15 – 30 % массы БЛА и, очевидно, изменяется в указанном интервале в процессе облета территории по мере их распыления.

В связи с этим актуальной представляется задача оптимального планирования маршрута БЛА при облете полей и распылении растворов удобрений/СЗР. Оптимизация маршрута позволит сократить время выполнения технологической операции, а также уменьшить затраты электроэнергии (топлива) на работу БЛА, и, таким образом, повысить эффективность их использования.

С учетом наличия исходных априорных данных о состоянии окружающей среды, получаемых заранее на этапе мониторинга полей, решение задачи предполетной маршрутизации БЛА предлагается реализовать на основе методов совещательного планирования перемещений, когда маршруты рассчитываются в явном виде на основе глобальных мировых сведений [1].

Пусть масса пустого БЛА, с оборудованием, но без рабочего раствора, равна m^* кг, а максимально допустимая масса рабочего раствора равна m_Σ кг.

Пусть в результате предварительного мониторинга определено множество $V_N = \{\vec{p}_1, \vec{p}_2, ..., \vec{p}_N\}$ целей на местности, которое необходимо посетить, где $\vec{p}_n\left(p_n^x, p_n^y, p_n^z\right)$ – координаты целей в инерциальной системе координат «север-восток-вниз», связанной с Землей [1]; $n = 1,...,N$. Множество $M_N = \{m_1, m_2, ..., m_N\}$ есть множество значений массы рабочего раствора удобрений/СЗР, которую необходимо распылить в соответствующих точках поля. Считаем, что точка начала полета БЛА $\vec{p}_s$ и окончания полета $\vec{p}_e$ совпадают: $\vec{p}_s = \vec{p}_0$, $\vec{p}_e = \vec{p}_{N+1} = \vec{p}_0$. Таким образом, $V^+ = V_N \cup (\vec{p}_s, \vec{p}_e)$ есть множество точек планируемого маршрута.

На основе приведенных исходных данных для поиска оптимального маршрута следует составить ненаправленный граф $G=\left(V^{+},E\right)$, где E – множество ребер графа. При кратчайшем по протяженности маршруте желательно, чтобы большая часть объема рабочего раствора расходовалась бы в начале маршрута. Исходя из этих соображений, для n-го по счету участка маршрута, соответствующего ребру графа $E_{i,j}$, значение веса можно определить выражениями:

$$
\begin{aligned}
& l_{i,j}=\left\|\vec{p}_i-\vec{p}_j\right\| \text{ – длина участка маршрута;} \\
& M_n=m^{*}+m_{\Sigma}-\sum_{k=1}^{n} m_k \text{ – масса БЛА на } n\text{-м участке маршрута;} \\
& w_{n,i,j}=\left\|\vec{p}_i-\vec{p}_j\right\|\cdot\left(m^{*}+m_{\Sigma}-\sum_{k=1}^{n} m_k\right), \quad i\neq j, \\
& w_{n,i,j}=+\infty, \quad i=j.
\end{aligned}
\tag{1}
$$

По своему физическому смыслу это приблизительно соответствует механической работе по перемещению тела массой M_n на расстояние $l_{i,j}$.

В данном случае можно предложить следующий квазиоптимальный подход к улучшению критерия энергоэффективности работы БЛА:

– шаг 1: поиск по алгоритму Литтла [1] на графе G с весами ребер $w_{n,i,j}=\left\|\vec{p}_i-\vec{p}_j\right\|, i\neq j$, пропорциональными длине пути без учета изменения массы в процессе облета, дает в результате кратчайший по расстоянию маршрут облета;

– шаг 2: так как начало и конец маршрута находятся в одной точке, то с использованием (1) определяется оптимальное направление следования по полученному маршруту: по направлению или против направления часовой стрелки.

Предложенная в работе постановка и подход к решению задачи планирования маршрута БЛА при дифференцированном внесении удобрений/СЗР в рамках систем точного земледелия позволяет получить квазиоптимальное решение одновременно по двум критериям: минимизация времени облета и минимизация затрат электроэнергии (топлива) на работу БЛА.

1. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.

УДК 621.793

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Белявин К.Е.[1], Белоцерковский М.А.[2], Сосновский И.А.[2], Курилёнок А.А.[2]

1). Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь;
2). Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь.

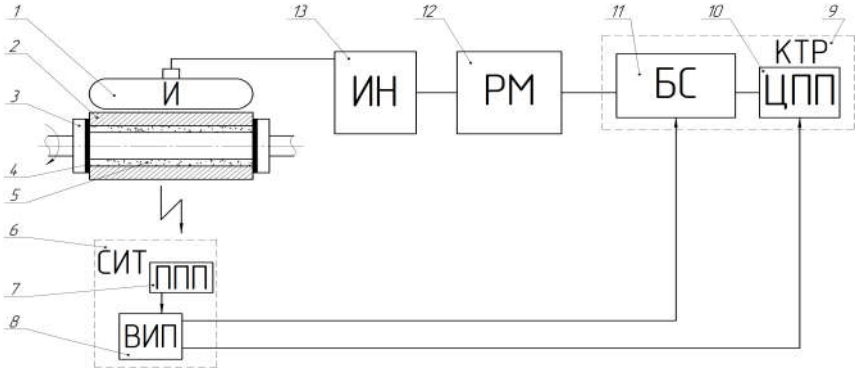
Основными недостатками известных системы контроля и управления технологическими режимами нагрева в процессе центробежной индукционной наплавки (ЦИН) [1] является невозможность обеспечения управления нестационарными температурными режимами индукционного нагрева, что приводит к снижению качества получаемых изделий с покрытиями.

Целью настоящей работы являлось создание автоматизированной системы контроля и управления нестационарными температурными режимами индукционного нагрева в процессе ЦИН для повышения качества изготавливаемых изделий, так как структура и физико-механические свойства покрытий существенно зависят от режимов нагрева.

Автоматизированная система контроля и управления нестационарными температурными режимами процесса ЦИН состоит из следующих составных частей (блоков) (см. рисунок 1): I) Индуктор И; II) Система измерения температуры СИТ, состоящая из первичного пирометрического преобразователя ППП и вторичного измерительного преобразователя ВИП; III) Контроллер температурных режимов, состоящий из цифрового преобразователя программатора ЦПП и блока согласования БС; IV) Регулятор мощности РМ; V) Источник нагрева ИН; VI) Обрабатываемая деталь.

Снабжение системы контроля и управления контроллером температурных режимов КТР и блоком согласования БС позволяет обеспечить оптимальное управление нестационарными температурными режимами индукционного нагрева для получения покрытий с высокими физико-механическими характеристиками и, как следствие, повысить качество изготавливаемых изделий. При этом соединение контроллера температурных режимов КТР и блока согласования БС между собой, а контроллера температурных режимов КТР с системой измерения температуры СИТ, позволяет получать исходные данные для расчета параметров оптимального режима нагрева. Соединение блока согласования БС с регулятором мощности РМ источника нагрева ИН обеспечивает преобразование параметров оптимального режима нагрева в

приемлемую форму сигнала для управления мощностью источника нагрева ИН.



1 – индуктор И; 2 – заготовка; 3 – зажимные центра; 4 – антипригарные прокладки; 5 – наплавляемая порошковая шихта; 6 – система измерения температуры СИТ; 7 – первичный пирометрический преобразователь ППП; 8 – вторичный измерительный преобразователь ВИП; 9 – контроллер температурных режимов КТР; 10 – цифровой преобразователь программатора ЦПП; 11 – блок согласования БС; 12 – регулятор мощности РМ; 13 – источник нагрева ИН.

Рисунок 1 – Схема автоматизированной системы контроля и управления нестационарными температурными режимами процесса нанесения покрытий центробежным индукционным методом

Принцип работа автоматизированной система контроля и управления нагревом. На контроллер температурных режимов КТР поступают сигналы напряжения обратной связи, соответствующие температуре детали со вторичного измерительного преобразователя ВИП системы измерения температуры СИТ. Контроллер температурных режимов КТР обрабатывает полученные сигналы, сравнивает их с заранее заданными значениями функции оптимального управления температурным режимом, и выдает оптимальный сигнал управления на вход блока согласования БС, который преобразует полученный сигнал в сигнал входной формы регулятора мощности РМ. Регулятор мощности РМ управляет работой источника нагрева ИН (генератора токов высокой частоты) и подает мощность на индуктор И, нагревающему деталь. После завершения процесса формирования покрытия центробежным методом отключают источник нагрева ИН (генератор токов высокой частоты), и охлаждают наплавленную деталь до кристаллизации покрытия, после чего отключают вращение. Затем наплавленную деталь с покрытием снимают и охлаждают на воздухе.

1 Белявин, К.Е. Инженерные методы расчета температурно-временных параметров в процессах центробежной индукционной наплавки покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок / Перспективные материалы и технологии : монография. В 2-х т. Т. 2 / под ред. чл.-корр. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – Гл. 1. – С. 5–18.

УДК 621.33

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

Нитиевский С.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

При рассмотрении имитационной модели тягового электропривода возникает вопрос моделирования механической части с целью анализа влияния процессов, происходящих в ней, на управление тяговым электроприводом. Наиболее важное значение это имеет при моделировании работы электропривода рельсового транспорта, поскольку площадка контакта «колесо-рельс» сравнительно мала по сравнению с пневмоколесным транспортом, а также значительно меньше коэффициент сцепления между поверхностями «металл-металл».

Рассмотрим одну из наиболее распространенных в настоящее время кинематических схем привода колесной пары. В этой схеме тяговый двигатель соединен с быстроходным валом тягового редуктора через муфту, а тихоходный вал редуктора передает вращение на колеса, реализующие тяговое усилие. Данной кинематической схеме соответствует структурная схема, показанная на рисунке 1.

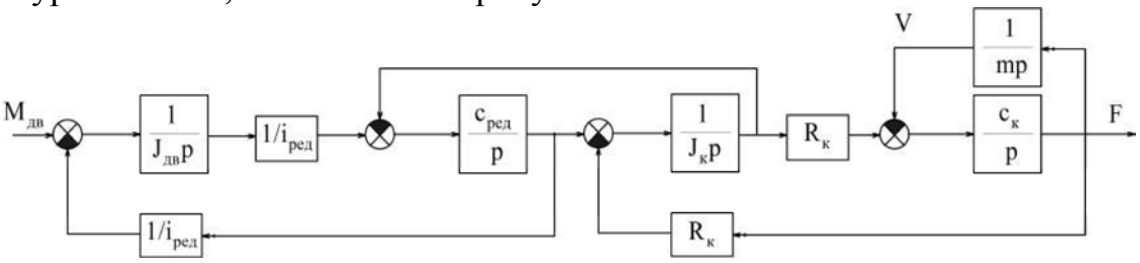


Рисунок 1 – Структурная схема механической части

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: M – вращающий момент двигателя; $J_{дв}$ – момент инерции ротора тягового двигателя; $J_к$ – момент инерции колеса; $C_р$ – жесткость тягового редуктора; $C_к$ – жесткость колеса; i – передаточное число редуктора; $R_к$ – радиус ходового колеса; F - тяговое усилие; m – масса состава, приходящаяся на одну колесную пару.

Однако данная структурная схема и описывающая ее математическая модель не учитывает ряд особенностей рельсового транспорта, таких, как наличие зазоров между массами при трогании с места, характер изменения нагрузки электропривода (для тяговых электроприводов, как известно, являющейся функцией скорости), а также характер процессов, происходящих в пятне контакта. Из вышеперечисленных недостатков наиболее существенным является именно последний, поскольку эффект проскальзывания и соответствующего этому проскальзыванию коэффициента сцепления накладывает ограничение на величину допустимой реализуемой силы тяги. Известно, что в случае, если сила

тяги, развиваемая приводом, превысит порог допустимой по условиям сцепления, то произойдет срыв сцепления.

Из теории локомотивной тяги известно, что сила тяги локомотива или самоходного вагона зависит от двух составляющих – его сцепной массы (эффективного давления на ось) и величины коэффициента сцепления ψ. Коэффициент сцепления ψ является нестационарной величиной, зависящей как от значения абсолютной скорости движения (коэффициент сцепления максимален при трогании с места и уменьшается с ростом скорости), так и от относительной скорости проскальзывания $v_{ск}$ (рисунок 2) [1].

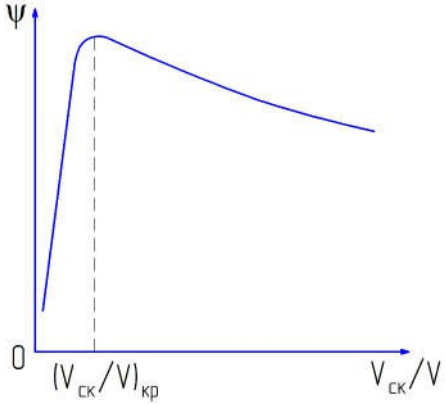


Рисунок 2 – Кривая коэффициента сцепления

Как видно из рисунка 2, для наилучшей тяги необходимо поддерживать относительную скорость проскальзывания как можно более близкой к критическому значению (порядка 1,5 %). Возможная реализация данного ограничения в системе MATLAB показана на рисунке 3.

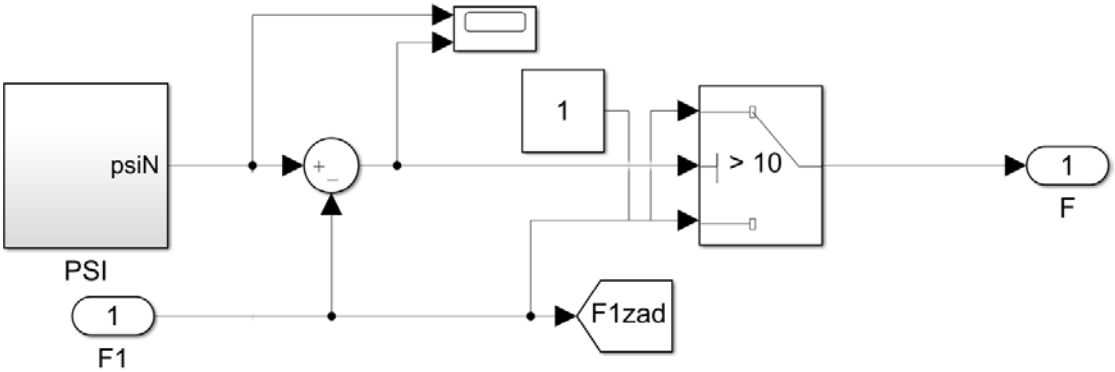


Рисунок 3 – Реализация ограничения в MATLAB

Учет этих процессов в модели позволяет подобрать наиболее оптимальные законы управления тяговым электроприводом, отвечающие всем технологическим требованиям.

1.Зарифьян, А.А. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А.А. Зарифьян. –М.: ФГБОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2013. – 411 с.

УДК 669.14.018.252.2 (083.74) (476)

ГАРМОНИЗАЦИЯ СТАНДАРТОВ ISO 683-1:2016, ISO 683-2:2016, ISO 683-3:2019 КАК ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ИМПОТРОЗАМЕЩАНИЯ ПРОКАТА

Покровский А.И., Хина Б.Б., Толкачева О.А., Глушаков А.Н., Хроль И.Н., Шенец С.Л.
Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь.

В настоящее время в Республике Беларусь действует ряд стандартов на химический состав и механические свойства проката конструкционных сталей марок: 45, 40Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 20Г2 (ГОСТ 4543-71, ГОСТ 4543-2016, ГОСТ 1050-88, ГОСТ 1050-2013). Указанные стандарты регламентируют химический состав и механические свойства сталей, разработанных еще в советское время.

В целях повышения конкуренции необходимо применение передового мирового опыта и сравнение, применяемых в нашей стране сталей, с мировыми аналогами.

Гармонизация стандарта – это приведение его содержания в соответствие с другим стандартом для обеспечения взаимозаменяемости продукции, взаимное понимание результатов испытаний и информации.

Гармонизация стандартов способствует развитию экономики, расширению внешней торговли, укреплению научно-технических, экономических и промышленных связей с зарубежными странами, повышению качества отечественной продукции, и ее конкурентоспособности на мировом рынке.

Для гармонизации стандартов проведены испытания по сравнению химического состава, механических характеристик, термической обработке, методикам проведения испытаний. Рассмотрены существующие зарубежные и В Беларуси в области черной металлургии и, в частности, в производстве круглого стального проката давно стало необходимым расширение номенклатуры производства сталей и применение международных стандартов.

отечественные стандарты на конструкционные стали для закалки и отпуска и для цементации, а также нормативная документация, подходы к гармонизации зарубежных стандартов, с целью их применимости в условиях Беларуси с учетом технологических особенностей производства проката на ОАО «БМЗ - управляющая компания холдинга «БМК».

По результатам проведенных испытаний образцов проката из низколегированных и углеродистых сталей соответствующих ISO 683-1:2016, ISO 683-2:2016, ISO 683-3:2016 и образцов проката, произведенных в соответствии с существующими ГОСТами на растяжение и ударную вязкость установлено, что европейские аналоги сталей являются более качественные, как по примесям (сера, фосфор), так и с более узкими

пределами легирования хромом, молибденом (марки 42CrMo4, 20MnCrS5, S355J2 и др.) [1-3].

Государственным научным учреждением «Физико-технический институт НАН Беларуси» разработаны гармонизированные стандарты **СТБ ISO 683-1-2020** «Стали термообрабатываемые, легированные и автоматные. Часть 1. Нелегированные стали для закалки и отпуска», **СТБ ISO 683-2-2020** «Стали термообрабатываемые, легированные и автоматные. Часть 2. Легированные стали для закалки и отпуска», **СТБ ISO 683-3-2020** «Стали термообрабатываемые, легированные и автоматные. Часть 3.Цементуемые стали», которые Постановлением Госстандарта от 02.02.2020 №6 «Об утверждении, введении в действие, отмене и изменении технических нормативных правовых актов» введены в действие с 01.05.2020 г.

В рамках выполнения работ по гармонизации стандартов в «Физико-техническом институте НАН Беларуси» разработана технология производства сортового проката:

1. Комплект ТД с литерой «O_1» часть №1. Технологический процесс **№ТП 25010.00036** на выплавку опытных партий сталей в дуговой сталеплавильной печи №3 емкостью 100 тонн, их внепечную обработку и разливку в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

2. Комплект ТД с литерой «O_1» часть №2. Технологический процесс **№ТП 25021.00018** на производство сортового проката опытных партий сталей на стане 850 в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

3. Комплект ТД с литерой «O_1» часть №3. Технологический процесс **№ТП 25021.00019** на производство сортового проката опытных партий сталей на стане 370/150 в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

По разработанным «Физико-техническим институтом НАН Беларуси» гармонизированному международному стандарту СТБ ISO 683-2020 и новой технологии ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» с 2020 г. начало выпускать сортовой прокат конструкционных марок сталей (круг в диапазоне диаметров от 20 до 160 мм).

1. СТБ ISO 683-1-2020 «Стали термообрабатываемые, легированные и автоматные. Часть 1. Нелегированные стали для закалки и отпуска» - Минск: БелГИСС, 2020. - 48 с.

2. СТБ ISO 683-2-2020 «Стали термообрабатываемые, легированные и автоматные. Часть 2. Легированные стали для закалки и отпуска», - Минск: БелГИСС, 2020 - 44 с.

3. СТБ ISO 683-3-2020 «Стали термообрабатываемые, легированные и автоматные. Часть 3.Цементуемые стали» - Минск: БелГИСС, 2020 - 36 с.

УДК 621.311

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЧЕТЧИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Чиж Е.М., Гутич И.И.
Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

На сегодняшний день такая тема, как модернизация счётчиков электрической энергии становится всё более обширной. Интеллектуальные, или как их еще принято называть «умные», счётчики вот уже на протяжении нескольких лет внедряются в наш обиход. В данной статье разберемся, что же такое «умный» или интеллектуальный счётчик.

Интеллектуальный счётчик – это счётчик нового поколения, который позволяет самостоятельно передавать всю информацию в энергоснабжающую организацию. «Умные» счетчики электроэнергии определяют данные более точно и детально.

Первое и очень важное достоинство такого счётчика – это экономия вашего времени. Показания снимаются и передаются в специальное программное обеспечение с помощью сети интернет. Следовательно, это освобождает потребителя от необходимости снимать и передавать показания в Энергосбыт самостоятельно.

Следующий положительный факт - это возможность установки нескольких тарифов и быстрая, удаленная параметризация.

Интеллектуальные счётчики предотвращают ошибку подачи ложной, недостоверной информации. Пользователь с «умным» счётчиком платит только за то количество электроэнергии, которое он израсходовал.

Данные о количестве потребленной электроэнергии в режиме реального времени отображаются в «Личном кабинете» пользователя.

Интеллектуальный счетчик способен регистрировать все несанкционированные действия, произведенные со счетчиком и при этом сообщать о них на верхний уровень учета. Все действия записываются в журнал учёта. Данный журнал находится в энергонезависимой памяти и не стирается при отключении питания. Пользователь в любое время может открыть приложение и просмотреть отчёт, а также получить его в бумажном виде.

Интеллектуальный счётчик состоит из двух основных частей: из самого счётчика и контроллера, который необходим для передачи данных на сервер.

Передача данных контроллером происходит с помощью проводных и беспроводных технологий, а также комбинированным методом. Наиболее простой, современный и недорогой способ передачи данных – беспроводной контроллер.

УДК 544.537

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛАСТЕРАМИ ТИТАНА

Акула И.П.[1], Маркевич М.И.[1], Малышко А.Н[1].,
Чекан Н.М. [1], Щербакова Е.Н. [2]
1). ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь
2). Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В последнее время в мире большое внимание уделяется разработкам композиционным материалам (на основе тканей), поглощающих электромагнитное излучение. В данной работе модификация ткани кластерами титана производилась в вакууме с использованием источника стационарной металлической плазмы (титан), работающего в режиме сепарации. Покрытие наносилось на смесовую ткань 07С11-КВ (производитель («Моготекс»).

Поскольку температура покрытия при его формировании на поверхности основы может достигать нескольких сотен градусов Цельсия, то процесс велся путем чередования периодов работы источника плазмы (1 минута) и паузы для охлаждения ткани (1 минута).

Предварительно перед формированием покрытий поверхность тканей обрабатывалась высокоэнергетичными ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 минут при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере порядка $3{,}2\times10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение 2000 В, ионный ток 40 мА.

Исследования структуры синтезированных материалов производилось с использованием растрового электронного микроскопа MIRA 3. Исследования элементного состава образцов проводились с помощью системы энергодисперсинного (EDS) микроанализа, установленной на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 [2]. Особенностями микроскопа являются In-Beam – детекторы, встроенные в объективную линзу, позволяют получать изображения превосходного качества во вторичных и в отраженных электронах, высокая скорость сканирования вплоть до 20 нс/пкс

Как следует из рисунка 1а, нанесенное покрытие однородно покрывает поверхность ткани. Размер филамента ткани с покрытием составляет примерно 8 мкм.

Из рисунка 1б следует, что при нанесении покрытия формируется капельная фаза. Капли различаются по размеру, размеры капель варьируются от 0,3 до 0,5 мкм.

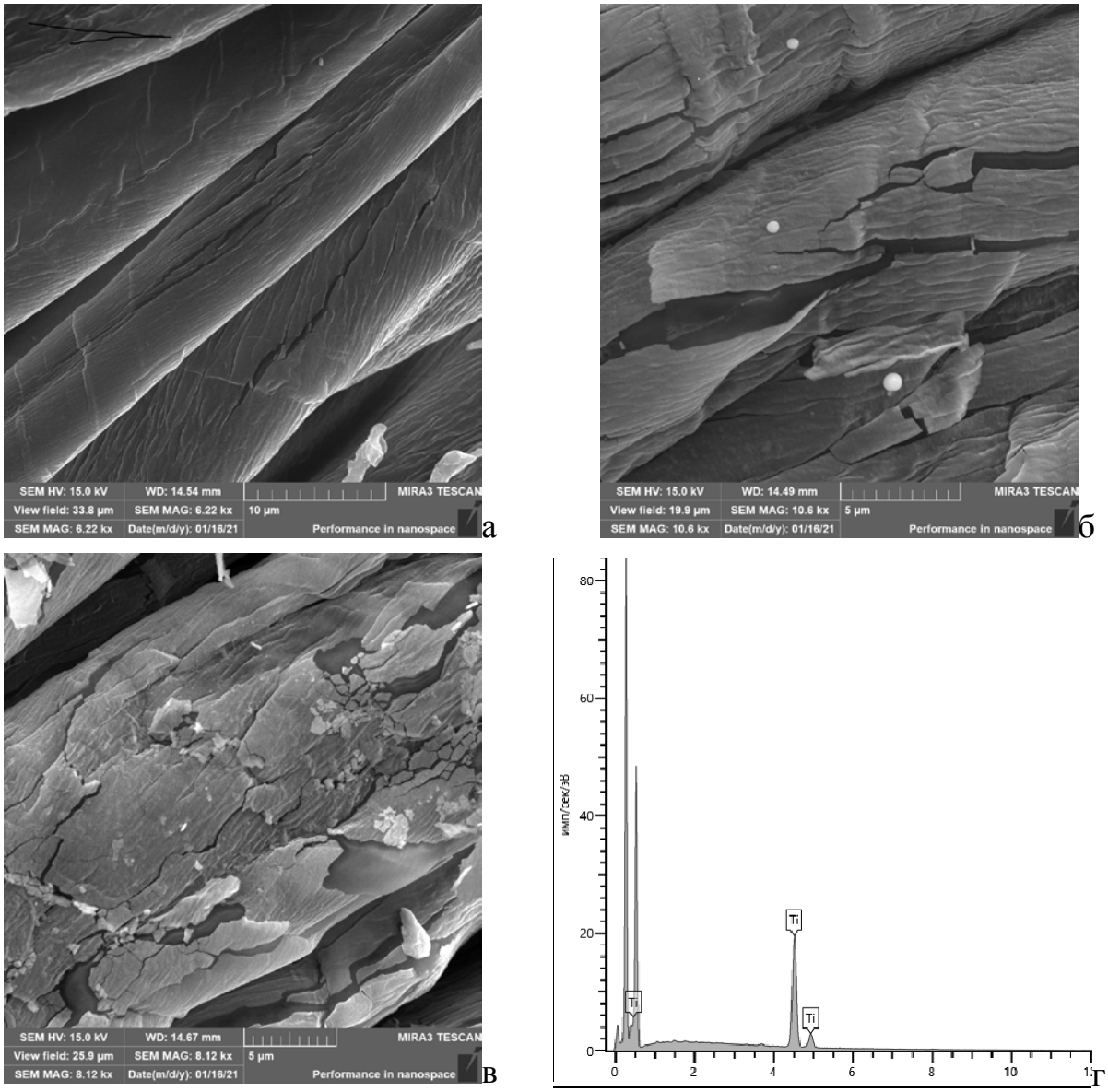


Рисунок 1 - Морфология (а,б,в) и элементный состав покрытия (г), нанесенного на поверхность ткани 07С11-КВ

На рисунке 1в представлены дефекты покрытия, неоднородные по толщине, состоящие из отдельных кусочков, разделенных между собой трещинами. По - видимому, при формировании покрытия возникают упругие напряжения в системе подложка – осажденное титановое покрытие, приводящее к его растрескиванию.

1. Бондарчук, М. М. Подходы к классификации технического текстиля// Проблемы современной науки и образования. -2015.-№ 11 (41).-С. 95-99.
2. Адашкевич, С.В. Магниторезонансная диагностика радиопоглощающих композиционных материалов / С.В.Адашкевич [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2015.- Т.1, №1.- С.71-75.

УДК 620.3

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Маркевич М.И.[1], Малышко А.Н[1].,
Журавлева В.И. [2], Щербакова Е.Н. [3]
1). ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь
2). Военная академия Республики Беларусь,
Минск, Беларусь
3). Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Интерес к наноматериалам, особенно к наночастицам обусловлен существенным изменением их физических свойств по сравнению с массивными материалами, вызванный соизмеримостью вкладов в свободную энергию наночастицы, как объемной, так и поверхностной составляющей. Преимуществами абляции материала в жидкостях являются: относительная простота процесса, возможность получения готовых коллоидных растворов, получения частиц малого размера.

Принципиально новый материал, который состоит из воды и наночастиц алюминия был разработан для применения в двигателях и устройствах преобразования энергии [1].

В качестве мишени использовали поликристаллический алюминий, а в качестве среды, в которой находилась мишень, применяли дистиллированную воду. Жидкость принудительно не перемешивали. Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10Гц, энергия одиночного импульса~0,05Дж).

Образованная в результате испарения алюминия под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц воздуха, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции. Образец обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий 1000 - 1500 Дж при временах экспозиции от 10 до 25 мин. Размеры образцов: толщина ~10 мм, длина - 30 мм, ширина – 12 мм.

В процессе получения и во время хранения водных растворов наночастиц алюминия не применяли поверхностно-активные вещества. Исследования образцов проводились на растровом электронном микроскопе MIRA-3. В настоящей работе исследовались морфология поверхности наночастиц алюминия.

На рисунке 1 приведены частицы алюминия, образовавшиеся в результате лазерного воздействия. Размер частиц составляет от 20 нм до

0,6мкм (рисунок 1). На поверхности крупной частицы размером 1000 нм видны более мелкие частицы. Форма некоторых частиц имеет правильную кристаллографическую огранку.

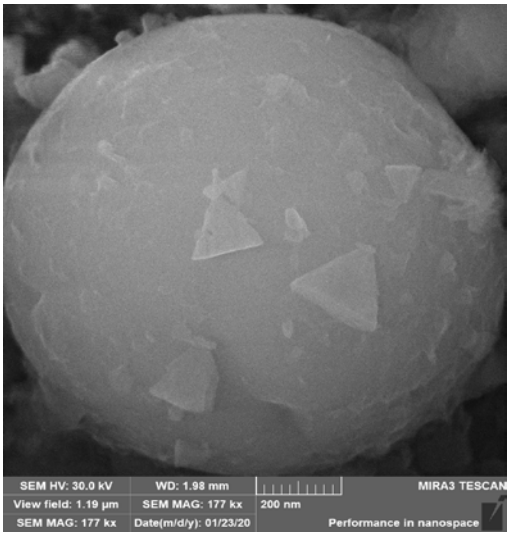


Рисунок 1 – Морфология поверхности частиц, образовавшихся в результате лазерного воздействия. Вложенная энергия 1500 Дж, время воздействия 25 мин.

При выходе эрозионной плазмы, образующейся под действием лазерного импульса в водную среду, происходит ее охлаждение со скоростью более 10^6 град/с. Наночастицы, полученные методом лазерной абляции в жидкости, как показывают исследования [2] могут быть, как кристаллическими, так и аморфными (рисунок 2). Процесс конденсации наночастиц может происходить по двум различным механизмам: пар-жидкость (п→ж) и пар-кристалл (п→к) [2]. Образовавшаяся по механизму п→ж наночастица может находиться в аморфном состоянии или в дальнейшем кристаллизоваться (частица имеют правильную геометрическую форму в виде треугольников) по механизму (ж→к) (рисунок 1).

На рисунке 1 приведены частицы алюминия, образовавшиеся в результате лазерного воздействия. Размер частиц составляет от 20 нм до 0,6 мкм (рисунок 1). На поверхности крупной частицы размером 1000 нм видны более мелкие частицы. Форма некоторых частиц имеет правильную кристаллографическую огранку.

1. Risha, G.A. Tappan Combustion of nanoaluminium and liquid water / G.A. Risha [et al] //Proc. Combust. Inst.-2007.-V.31.- N2.- P. 2029-2036.

2. Маркевич, М.И., Чапланов, А.М. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М.И. Маркевич, А.М. Чапланов //Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук.- 2016.- №1.- 2016.-С.28-35.

УДК 621.785

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА МОДИФИЦИРОВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

Алексеев Ю.Г., Будницкий А.С., Сенченко Г.М., Веремеюк С.Р.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Благодаря особым свойствам титан и сплавы на его основе получили в настоящее время широкое распространение при производстве ряда ответственных изделий. Эти материалы применяются в самолетостроении, атомной энергетике, космической технике, ультразвуковой технике, а также при производстве изделий медицинского назначения. Причем именно производство изделий медицинского назначения является в последнее время одной из важнейших сфер применение титана и его сплавов.

К важнейшим преимуществами титана и титановых сплавов относятся малая плотность, высокая удельная прочность, высокая жаропрочность и чрезвычайно высокая коррозионная стойкость, обусловленная способностью титана образовывать на поверхности тонкие сплошные оксидные пленки. При этом имеются недостатки, которые ограничивают, а в некоторых случаях делают невозможным применение титана при изготовлении многих изделий. К ним относятся низкая износостойкость и усталостная прочность, плохие антифрикционные свойства, обусловленные налипанием частиц титана на контртело, в особенности при работе пары трения титан-титан. Поэтому применение изделий из титана и его сплавов в узлах трения и в подвижных соединениях является крайне ограниченным. Обладая незначительной толщиной окисной пленки и большой реакционной способностью участков поверхностей, образующихся в процессе трения, титан склонен к схватыванию с последующим повреждением поверхностей контакта.

Существующие способы повышения твердости, износостойкости и антифрикционных характеристик поверхности изделий авиационной техники, машиностроения и медицины из титана и его сплавов, применяемые в настоящее время в мировой практике, основаны на модифицировании поверхностного слоя с применением ионно-плазменных и химико-термических методов. Применяемые методы позволяют получать на поверхности титана и его сплавов упрочненные слои с микротвердостью до 20 ГПа толщиной до 0,2 мм.

Повышение прочностных и антифрикционных свойств поверхности титана и его сплавов методом химико-термической обработки достигается за счет диффузионного насыщения азотом, бором, кремнием, металлами. Наиболее распространенным видом химико-термической обработки титана и титановых сплавов является азотирование, позволяющее добиться

высоких значений микротвердости. Химико-термическое азотирование титана достигается нагреванием его в атмосфере аммиака или азота, соответственно, при 870 и 980 °С. Недостатком метода является ухудшение таких механических свойств титана, как прочность, пластичность и вязкость, что связано с образованием на поверхности, наряду с нитридным, также и гидридного слоя. Другим недостатком способа является малая глубина упрочненного слоя – до 0,16 мм. Кроме того, максимальное упрочнение поверхности достигается после очень продолжительной обработки – 16 ч. Ионно-плазменное азотирование обеспечивает диффузионное насыщение поверхностного титана и титановых сплавов азотом в азотной плазме при температуре 800–950 °С. Кроме повышения износостойкости и антифрикционных характеристик, метод обеспечивает повышение коррозионной стойкости поверхности титана. К недостаткам метода необходимо отнести сложность его реализации, необходимость дорогостоящего технологичного оборудования и достаточно большую длительность обработки – 3–6 ч.

В качестве альтернативы существующим методам модифицирования поверхности титана и титановых сплавов нами предложен метод электрохимико-термической обработки – электролитно-плазменный нагрев в азот- или углеродсодержащем электролите с последующей закалкой путем отключения рабочего напряжения. При подаче напряжения в диапазоне 100–300 В на электрохимическую ячейку, вокруг заготовки происходит локальное вскипание жидкости за счет выделения джоулева тепла. В этих условиях электролит вблизи поверхности заготовки разогревается до температуры кипения и обрабатываемая заготовка, оказываясь отделенной от основной массы электролита, разогревается до температур 400–1100 ºС. Высокие температуры заготовки позволят проводить насыщение поверхности атомами легких элементов, содержащихся в веществах-донорах, растворенных в электролите. Наличие в электролите углеродсодержащих и азотсодержащих компонентов обусловливает определенный углеродный или азотный потенциал парогазовой оболочки, в результате чего становится возможной химико-термическая обработка. В условиях электролитно-плазменного нагрева интенсифицируются диффузионные процессы, что позволит значительно сократить время химико-термической обработки до 5–10 мин.

Преимуществами такого метод перед другими существующими методами термической обработки является высокая скорость нагрева заготовки (до 250 °С/с), а также высокая скорость диффузионного насыщения (до 100 мкм/мин). Кроме того, применение электролитно-плазменного нагрева позволяет сформировать на поверхности защитный оксидный слой, обеспечивающий дополнительное повышение коррозионной стойкости.

УДК 621.9.047.7

ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗМЕРНОЙ И ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Королёв А.Ю., Нисс В.С., Паршуто А.Э., Сорока Е.В.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Для снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса электролитно-плазменного обработки (ЭПО) с целью, модификации и полирования поверхности изделий из металлических материалов, их размерной обработки при сохранении высокой интенсивности, качества и экологической безопасности разработан принципиально новый импульсный метод (импульсная ЭПО), совмещающий преимущества как электрохимического, так и электролитно-плазменного процесса. Разработанный метод импульсной ЭПО основан на применении униполярного импульсного режима с длительностью импульсов 0,5–10 мс и амплитудой более 200 В, при котором в пределах каждого импульса последовательно чередуются электрохимическая стадия, переходная стадия и устойчивая стадия ЭПО [1].

Повышение эффективности разработанного процесса импульсной ЭПО достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии с низкими энергетическими затратами и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии, при которой обеспечивается высокое качество поверхности. Повышение частоты следования импульсов при снижении их длительности позволяет увеличить электрохимическую составляющую процесса и обеспечить более интенсивный съем металла с поверхности, удалить значительные неровности поверхности и т.п. Снижение частоты следования импульсов при одновременном увеличении их длительности позволяет увеличить электролитно-плазменную составляющую процесса и достигнуть низкой шероховатости при общем снижении энергоемкости процесса.

Использование импульсного технологического напряжения сделало возможным независимо управлять каждой стадией процесса. Расчет энергетических затрат показал, что в процессе импульсной ЭПО съём металла в шесть раз больше, чем при традиционной ЭПО. При этом удельная мощность в импульсном процессе больше только в 2,9 раза. Таким образом производительность импульсного процесса ЭПО, оцениваемая по съему металла, в два раза выше по сравнению с традиционным процессом на постоянном токе.

Проведенные исследования показали, что при импульсной ЭПО происходит более интенсивный съём съем материала с обрабатываемой поверхности, чем при традиционных методах электрохимического и

электролитно-плазменного полирования. Причём основной вклад в съем материала вносит электрохимическое воздействие токового импульса, возникающего в начальной стадии импульса, а электролитно-плазменная стадия обеспечивает полирование поверхности детали, но обеспечивает в несколько раз меньший удельный съём. Удельный съём металла при электрохимической стадии может быть больше, чем при электролитно-плазменной стадии в шесть раз (по результатам эксперимента съём для цилиндрического образца в 20%-ном электролите равен $16{,}2 \cdot 10^{-5}$ г/мм^{2}мин). Причём величину съёма можно изменять в меньшую сторону путём уменьшения паузы между импульсами. Это приводит к уменьшению амплитуды токового импульса и его длительности.

Больший удельный съем позволяет быстрее удалять мелкие дефекты металлообработки, например заусенцы. С целью проверки параметров снятия заусенцев были подготовлены детали в виде цилиндров диаметром 2 мм со шлифовкой торцов, и детали, вырезанные лазером из стали AISI 316. Для более быстрого удаления заусенцев подходит режим с большей амплитудой электрохимического импульса, когда длина импульса и паузы по 2 мс, амплитуда напряжения импульса 200 В. Электролит с большей концентрацией сульфата аммония способствует увеличению амплитуды электрохимического импульса и ускорению снятия заусенцев за счёт увеличения проводимости электролита.

В процессе экспериментов определено, что специальная предварительная очистка поверхности деталей перед обработкой не требуется. Обезжиривание поверхности, очистка от загрязнений и окалины осуществляется непосредственно в процессе обработки. Разработанный процесс не требует точного поддержания определённой температуры электролита. Наиболее стабильное протекание процесса, как и в случае с традиционным электролитно-плазменным полированием, наблюдается при достаточно высокой температуре электролита – около 90 °С. При этом в процессе обработки происходит мощный локальный разогрев электролита в прилегающей к поверхности анода области и даже при меньшей средней температуре электролита, в этой области самопроизвольно устанавливается близкая к оптимальной температура. Далее в результате теплообмена температура остального объема электролита также повышается и поддерживается на необходимом уровне.

1. Технология полирования с применением комплексного электрохимического и электролитно-плазменного воздействия в управляемых импульсных режимах / А.Ю. Королёв, В.С. Нисс, А.Э. Паршуто // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: мат. Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апреля 2019 г. – Могилев: БРУ, 2019. – С. 51–52.

УДК 621.794.61

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Алексеев Ю.Г., Паршуто А.Э., Сенченко Г.М., Янович В.А.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Светопоглощающие покрытия применяются в электронно-оптических системах, в приборостроении для снижения рассеянного светового фона, а также при изготовлении приемников излучения, преобразователей солнечной энергии, устройств оптической обработки информации, которые изготавливаются, как правило, из алюминиевых и титановых сплавов. Такие покрытия обеспечивают ослабление фонового излучения. Коэффициент ослабления различается в зависимости от типа и материалов покрытий, химико-физических свойств поверхностей, на которые их наносят.

К светопоглощающим покрытиям предъявляются особые требования: обеспечение заданного спектрального коэффициента отражения и коэффициента яркости; обеспечение механической прочности, твердости и стойкости к воздействию внешней среды в течение срока эксплуатации изделия, высокая адгезия покрытия к основанию. В ряде случаев от покрытия требуется также высокая устойчивость к ультрафиолетовому и ионизирующему излучению, низкому давлению.

Существующие в настоящее время методы получения светопоглощающих покрытий включают химические методы, анодное оксидирование с последующим окрашиванием в анилиновых красителях, электрохимическое осаждение, вакуумно-плазменную обработку, микродуговое оксидирование (МДО). Преимуществом химических методов является возможность обработки поверхностей сложных форм, а также низкая стоимость промышленного оборудования для получения покрытий. Основным недостатком является сложность управления в широких пределах эксплуатационными свойствами покрытий: коэффициентами отражения и яркости, адгезией, износостойкостью. Преимущество вакуумного метода нанесения светопоглощающих покрытий заключается в гибком управлении технологическими параметрами процесса, достижении заданных спектральных значений коэффициента отражения, что весьма затруднительно при использовании химических методов. При этом недостатком является сложность технологии, необходимость контроля большого количества технологических характеристик и высокая стоимость технологического оборудования.

Недостатками применяемых процессов черного никелирования являются как правило низкая коррозионная стойкость, низкая износостойкость формирующихся покрытий, а также их слабое сцепление

с металлом основы. Ультрачерные пленки, получаемые анодным оксидированием с последующим заполнением пор черным анилиновым красителем не устойчивы к ультрафиолетовому и ионизирующему излучению.

Существующие методы, основанные на применении МДО, обеспечивают высокие прочностные и эксплуатационные характеристики светопоглощающих покрытий: высокую износостойкость, твердость, термостойкость, коррозионную стойкость, хорошую адгезию к основе. Основным недостатком МДО являются низкие коэффициенты поглощения формируемых покрытий. Кроме того, особой проблемой является создание на основе метода МДО таких покрытий как на наружных, так и на внутренних поверхностях длинномерных изделий и изделий сложной формы – внутренних и наружных поверхностей корпусов оптических приборов, которые эксплуатируются в жестких условиях.

В применяемых методах МДО, как правило, используется переменный ток промышленной частоты (50 Гц), что сильно ограничивает возможность управления амплитудно-частотными характеристиками рабочих импульсов и свойствами формируемых оксидных слоев. Поэтому повышение оптических поверхности обычно осуществляется за счет разработки новых или усовершенствования существующих электролитов для МДО. Причем часто такие электролиты содержат токсичные компоненты и требуют постоянной корректировки в процессе работы, что затрудняет их широкое практическое применение.

Наряду с разработкой новых электролитов решением проблемы получения качественных светопоглощающих слоев на изделиях из алюминиевых и титановых сплавов с низким коэффициентом отражения, является совершенствование характеристик технологических импульсов процесса МДО и создание принципиально новых схем обработки с применением потоков электролита. Поэтому для решения проблемы получения качественных светопоглощающих покрытий, в том числе и на внутренних поверхностях, нами предложено выполнять процесс МДО с управляемыми анодными и катодными импульсами длительностью 3–10 мс с использованием специальной электродно-гидравлической системы. Изменение соотношений длительностей и амплитуд анодных и катодных импульсов тока позволяет значительно расширить технологические возможности процесса оксидирования, что дает возможность управлять характеристиками формируемых светопоглощающих покрытий в широких диапазонах значений. Для формирования на внутренней поверхности трубчатых изделий из алюминиевых и титановых сплавов оксидных слоев разработана специальная электродно-гидравлическая система, позволяющая создать в зоне обработки необходимые электрические и гидравлические условия для успешного протекания процесса микродугового плазменного процесса.

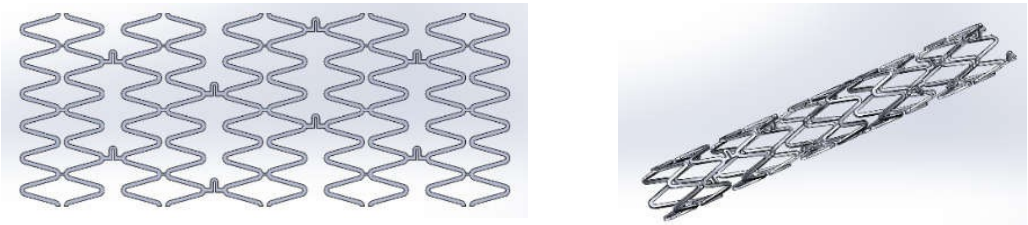
УДК 617-7:67.02

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТРИЧНЫХ КОРОНАРНЫХ СТЕНТОВ

Нисс В.С., Гавриленко В.В.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь.

Коронарный стент – это медицинское изделие, предназначенное для восстановления потока крови в коронарной артерии сердца. Стент представляет собой жесткую конструкцию цилиндрической формы, которая благодаря своим упругим свойствам поддерживает стенку сосуда. Материал стента должен отвечать требованиям биосовместимости, эластичности, прочности, коррозионной стойкости и радиальной жесткости [1]. Для коронарных стентов, из-за их миниатюрности, наиболее подходящими являются кобальт-хромовые сплавы в виду их высокой прочности, что позволяет уменьшать толщину стоек до 0,1 мм. Это значительно снижает частоту послеоперационных рестенозов [2].

Целью проводимых исследований являлась разработка технологии получения коронарных стентов из кобальт-хромового сплава. Вариант дизайна разработанных базовых элементов стента представлен на рисунке 1а (развертка) и рисунке 1б (3D-модель).



а *б*

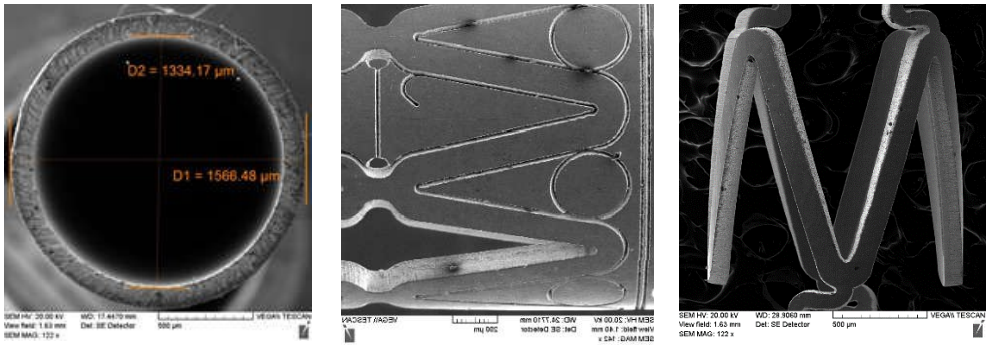
а – развертка стента; б - 3D-модель стента

Рисунок 1 - Дизайн базовых элементов стента

Каркас стента образован стойками, расположенными под углом друг к другу и образующими секцию. Секции соединены переходными элементами для обеспечения продольной гибкости стента.

Для получения стента требуемой толщины в качестве заготовки использовалась трубка кобальт-хромового сплава с толщиной стенки 0,11 мм (рисунок 2а).

Требуемый дизайн стента получен лазерной резкой фемтосекундным лазером, обеспечивающим малые значения ширины реза и глубины повреждаемой поверхности для создания большей ширины стоек и, соответственно, радиальной жесткости конструкции и площади наружной поверхности стента. Пример лазерного раскроя трубки представлен на рисунке 2б, ширина реза до 20 мкм. Для удаления фрагментов применялась ультразвуковая очистка. Очищенный образец представлен на рисунке 2в.

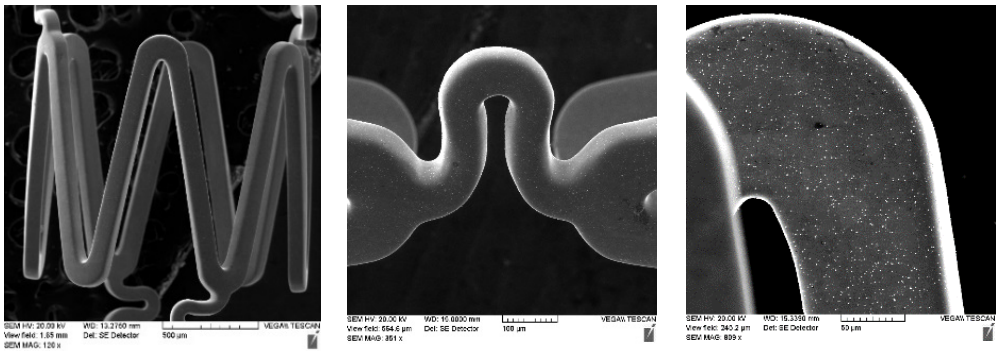


а *б* *в*

а - исходная трубка, б – после лазерной резки, в - после очистки

Рисунок 2 – Лазерная резка стента

Образовавшийся при лазерной обработке дефектный слой толщиной до 4 мкм требует удаления с обеспечением заданного уровня шероховатости. Требуемый параметр шероховатости поверхности не более Ra 0,4 мкм обеспечивался электрохимическим полированием в среде кислот. На рисунке 3 представлены фотографии элементов полированного стента: кольцо (а), компенсатор (б) и соединение стоек (в).



а *б* *в*

а – секция из стоек, б – компенсатор, в - переход между стойками

Рисунок 3 – Стент после электрохимической полировки

Полученный опытный образец стента соответствует разработанному дизайну и имеет качественную полированную поверхность, которая является важным фактором, обеспечивающим биосовместимость изделия, что подтвердили успешные испытания на животных в ходе стентирования коронарных сосудов с использованием разработанных образцов стентов.

1. Баикин А.С., Разработка композиционного биомедицинского материала «Наноструктурный никелид титана – биодеградируемый полимер»: дис. … канд. техн. наук : 05.16.06 / А.С. Баикин. – Москва 2019. – 140 л

2. Kastrati, A Intracoronary stenting and angiographic results: strut thickness effect on restenosis outcome (ISAR-STEREO) trial / A. Kastrati, J. Mehilli, J. Dirschinger // Circulation. 2001/6/12. – Vol. 103. – P. 2816-2821

УДК 621.794.61

ПОЛУЧЕНИЕ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Нисс В.С., Королёв А.Ю., Паршуто А.Э., Будницкий А.С.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Микродуговое оксидирование (МДО) относится к экологически безопасным процессам, так как позволяет проводить обработку в электролитах с низкой концентрацией неагрессивных компонентов, а также отсутствует необходимость тщательной предварительной подготовки поверхности перед обработкой. Данный вид обработки относится к электрохимическим процессам и отличается от традиционного анодного оксидирования образование локальных электрических искровых и микродуговых микроплазменных разрядов на обрабатываемой поверхности, в результате чего существенно увеличивается скорость формирования тонкого слоя керамикоподобного пористого покрытия с различным элементным и полифазовым составом [1]. Кроме того, процесс ведется при более высоких напряжениях – до 1000 В, причем чаще используется не постоянный, а переменный и импульсный токи. В особенности отмечается, что биполярный импульсный режим отличается мягкостью, регулируемым соотношением амплитудно-частотных значений катодного и анодного токов, что позволяет получать покрытия с большей толщиной, хорошей структурой и низкой пористостью [2].

Метод микродугового оксидирования широко используется для нанесения покрытий на многие вентильные металлы и их сплавы, в том числе на алюминиевые и титановые, широко применяемые в машиностроении. Недостатками традиционных методов МДО являются большая продолжительность обработки (до 120 мин) для формирования оксидных слоев необходимой толщины с требуемыми свойствами и, соответственно, высокие энергетические затраты. Такая большая длительность процесса традиционной МДО вызвана тем, что толщина формируемого оксидного слоя определяется количеством воздействующих технологических импульсов. Так, рабочая частота традиционного процесса МДО составляет 50 Гц, а технологические импульсы тока следуют с периодом 10 мс.

Решением проблем, связанных с повышением производительности процесса и значительным снижением времени обработки при одинаковой толщине оксидного слоя является предложенный нами метод, основанный на использовании полностью управляемых по амплитуде и длительности разнополярных импульсов напряжения 100–500 В низкой частоты 0,05–1 кГц с одновременным наложением в анодный полупериод

технологических импульсов амплитудой 600–1000 В высокой частоты (до 10 кГц). Использование высокочастотных режимов МДО позволяет существенно увеличить количество технологических импульсов тока в единицу времени и существенно уменьшить продолжительность обработки (до 3–4 раз). Использование регулируемой длительности и амплитуды технологических импульсов позволяет управлять потоками энергии в зонах пробоя оксидных слоев. Такого рода технологические режимы перспективны для получения оксидных слоев с низкой шероховатостью (Ra до 0,2–0,63 мкм) на алюминии и титане.

Дополнительное наложение на чередующиеся низкочастотные импульсы высоких по амплитуде высокочастотных импульсов в анодный полупериод позволяет обеспечить более легкий пробой пленки за счет повышения суммарного тока в этот полупериод, создает благоприятные условия для организации разрядов не только на оксидных пленках с явно выраженными вентильными свойствами, но и на других металлах. Использование высокочастотных импульсов способствует улучшению структуры покрытий, обеспечивает их мелкокристаллическую строение, приводит к повышению их плотности и микротвердости, уменьшению пористости. При этом высокочастотные импульсы имеют большую амплитуду напряжения, но меньшую мощность, чем низкочастотные импульсы. За счет большей амплитуды именно высокочастотные импульсы инициируют микродуговой процесс в дефектных местах покрытия, что обеспечивает его более плотное формирование.

Установлено, что при регулировании энергии в каналах пробоя формируемые покрытия отличаются более высокой термостабильностью и высокими значениями электросопротивления по сравнению с покрытиями, полученными без ограничения энергии. Соответственно и другие физико-химические свойства покрытий, сформированные с использованием разработанного метода МДО, также могут контролироваться при регулируемой длительности и амплитуде технологических импульсов, что оказывает влияние на такие конечные характеристики МДО-покрытий, как твердость, пористость, пробойное напряжение и т.д. Эти режимы определяются выходными параметрами источника питания для МДО, определяющими начало и окончание микродугового разряда в каждом периоде.

1. Суминов, И. В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборуд.)/ И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин, Б. Л. Крит, А. М. Борисов — М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.

2. Yilmaz M. S., Sahin O. Investigation of the High Energy Single Pulses Affect on Micro Arc Oxidation Process on Aluminium. Proceedings of the 4th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'18). Madrid, Spain – August 16 – 18, 2018.

УДК 68.1.5.015

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС РЕЖИМОВ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Поминов А.Д., Лившиц Ю.Е.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь.

Умение правильно выбрать метод пуска асинхронного двигателя входит в набор навыков, которыми должен владеть инженер-электромеханик. Поэтому на кафедре РТС БНТУ разработан обучающий стенд для исследования способов пуска трехфазного асинхронного двигателя. Лабораторный комплекс, позволяет на практике изучить различные способы пуска трехфазных асинхронных двигателей, часто применяемых в технических системах.

При пуске асинхронных двигателей пусковые токи могут доходят до семи-восьми кратных значений от номинального тока данного двигателя, и последний подвергается большим электродинамическим усилиям. Происходит превышение температуры статорных, роторных обмоток опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов машины, а при прямом пуске асинхронных и синхронных двигателей большой мощности высокого напряжения происходит просадка сетей, что не желательно при действующих технологических процессах.

Задача любых способов пуска электродвигателя заключается в том, чтобы согласовать характеристики вращающего момента электродвигателя с характеристиками механической нагрузки, при этом необходимо, чтобы пиковые токи не превышали допустимых значений.

При пуске двигателя по возможности должны удовлетворяться основные требования: процесс пуска должен осуществляться без сложных пусковых устройств; пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковые токи - по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляют и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используют двигатели: необходимость плавного пуска, максимального пускового момента и др. [1].

В лабораторном комплексе для обучения использованы три основных вида пуска асинхронного двигателя такие как прямой, пуск «звезда-треугольник», плавный пуск для исследования их преимуществ и недостатков. Схема лабораторного стенда изображена на рисунке 1.

Как следует из названия, прямой пуск трехфазного асинхронного двигателя означает, что электродвигатель подключается к сети на номинальное напряжение. В лабораторном комплексе прямой пуск подключен через мини-контактор КМ3. Его обычно применяют при стабильном питании двигателя, если вал двигателя жестко привязан к приводу, например привод вентилятора или насоса.

УДК 621.314

УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Васильев С. В.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Одной из главных проблем использования регулируемого электропривода с полупроводниковым преобразователем частоты является обеспечение его электромагнитной совместимости с сетью электроснабжения и приводным электродвигателем. Снижение уровня электромагнитной совместимости преобразователя частоты выражается следующим образом: 1) снижение качества электрической энергии в системе электроснабжения (генерирование высокочастотных составляющих тока и напряжения в сеть электроснабжения); 2) снижение коэффициента мощности сети; 3) повышение потерь мощности; 4) нагрев электротехнических элементов систем электроснабжения (проводов, трансформаторов, дросселей и др.); 5) ухудшение работы систем автоматизации и телемеханики; 6) ложное срабатывание систем автоматики и защиты; 7) образование электромагнитных полей, которые оказывают негативное влияние на систему автоматического управления самого электропривода; 8) провалы напряжения и перенапряжения при пуске и торможении электрических двигателей [1].

Международные и отечественные стандарты жестко ограничивают эмиссию высших гармоник тока и напряжения в сеть электроснабжения и определяют уровень электромагнитной совместимости различных потребителей.

Упрощённое определение электромагнитной совместимости электропривода можно сформулировать как способность электропривода функционировать в реальных условиях под воздействием электромагнитных помех, при этом, не создавая недопустимых помех для работы другого электрооборудования и окружающей среды.

Таким образом, воздействие полупроводниковых преобразователей частоты промышленных электроприводов на сеть электроснабжения и других потребителей, обусловлено влиянием полупроводниковых преобразователей на качество электрической энергии. В ГОСТ 32144 – 2013 качество электрической энергии определено как степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электрической энергии[2].

В ГОСТ 32144 – 2013 одним из важных показателей качества электрической энергии является несинусоидальность напряжения.

Несинусоидальность напряжения – отклонения формы напряжения от синусоидальной. Показателями качества электрической энергии,

характеризующими несинусоидальность напряжения, являются коэффициент *n* – ой гармонической составляющей напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, соответственно:

$$K_{U(n)} = (U_{(n)} / U_{(1)})100\% = (U_{(n)} / U_{ном})100\%,$$

$$K_U = \left(\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2} \; / U_{(1)} \right) 100\% = \left(\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2} \; / U_{ном} \right) 100,$$

где $U_{(n)}$ – амплитудные (действующие) значения гармонических составляющих напряжения; $U_{(1)}$ – амплитудное (действующее) значение основной гармонической составляющей напряжения.

Известны частотные электроприводы с АД, имеющими две трёхфазные обмотки, смещенные в расточке статора друг относительно друга на некоторый угол θ. Каждая обмотка питается от автономного инвертора напряжения (АИН), причём две трёхфазные системы напряжений, подаваемые на обмотки АД, также сдвинуты во времени на некоторый угол γ. При равенстве модулей этих углов будет минимальное значение коэффициента нелинейного искажения намагничивающей силы статора и максимальное использование габаритной мощности АД.

В таком электроприводе необходимо обеспечить равенство модулей углов θ и γ, то есть

$$|\theta| = |\gamma| = 30 \text{ эл. градусов.} \qquad (1)$$

При соблюдении соотношения (1) в кривой результирующей намагничивающей силы (МДС) статора АД отсутствуют пространственные гармоники, соответствующие следующим временным гармоникам в кривой выходного напряжения преобразователя:

- К=12n+7 - для гармоник, вращающихся в сторону 1-ой гармоники;

-К=12n+5- для гармоник, вращающихся в обратную сторону по отношению к 1-ой гармонике, где n=0,1,2,3...

Важным является то, что в кривой МДС такой шестифазной обмотки АД полностью отсутствуют пятая и седьмая гармоники, что является одним из важных преимуществ перед обычной трехфазной обмоткой. Устранение наиболее вредных для электрических машин пятой и седьмой гармоник уменьшает дополнительные потери, шум и вибрацию, устраняет провалы в кривой электромагнитного момента, увеличивает пусковой момент АД и улучшает электромагнитную совместимость частотно-регулируемого электропривода.

1. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. - М.: СОЛОН-Пресс, 2015.

2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

УДК 004.415.2.031.43

ПЕРЕХОД ПРОИЗВОДСТВА К ИНДУСТРИИ 4.0

Дулуб Е.Д., Лившиц Ю.Е.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

«Индустрия 4.0» или «Четвертая промышленная революция» — это интеграция звеньев промышленной производственной цепи с применением новейших информационных и коммуникационных технологий, основой которых являются киберфизические системы. В отличие от уже свершившихся первой, второй и третьей промышленных революций, суть четвертой не только в появлении новых технологий, но и в объединении уже существующих в одну систему. История промышленных революций представлена на рисунке 1.

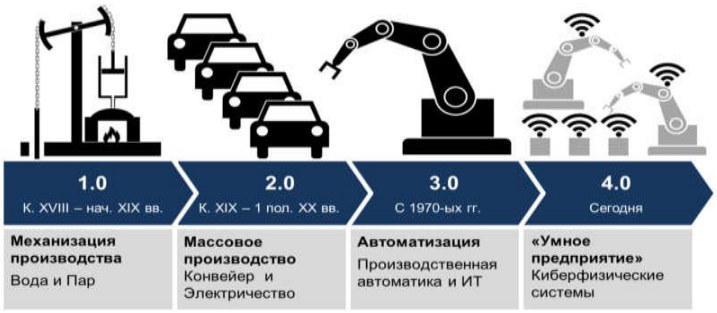


Рисунок 1 – История промышленных революций

Основная идея внедрения решений «Индустрии 4.0» заключается в том, чтобы дать производственным компаниям возможность расширять сотрудничество между различными отделами, делая необходимую информацию доступной в любом месте в режиме реального времени. Цель состоит в том, чтобы облегчить принятие надлежащих решений в нужное время, тем самым повышая эффективность и производительность.

Технологии, характеризующие «Индустрию 4.0» представлены на рисунке 2.

Рисунок 2 – Технологии «Индустрии 4.0»

Многие из этих элементов уже давно и успешно применяются на практике, но именно объединение их в одну целостную систему позволит развить концепцию «Индустрии 4.0».

УДК 62-519

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АСУТП ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОРЫВОВ

Синицын А.В., Лившиц Ю.Е.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

Вопрос сокращения потерь воды очень актуален для системы водоснабжения Республики Беларусь. Так по официальным данным национального статистического комитета Республики Беларусь: потери воды при транспортировке составили 41.7 млн. м^3, а прочие потери и неучтенные расходы воды – 87.3 млн. м^3 за 2019 год [1]. Значительной составляющей в объеме потерь являются утечки, то есть вытекание воды из трубопровода в следствие образования в нем механических повреждений или отсутствия герметичности соединений. Утечки могут быть разной интенсивности, одним из видов утечек высокой интенсивности является порыв. Порыв – происходит в случае разрушения элементов трубопровода. Он может быть вызван как внешним воздействием на трубопровод (например, при проведении строительных работ), так и резким повышением давления в водопроводной сети.

В Евросоюзе проблема утечек также актуальна и в нем был разработаны рекомендации по борьбе с утечками [2], с точки зрения возможности реализации данных рекомендаций в качестве алгоритмов в АСУТП водоснабжения можно выделить два основных направления.

1. Управление давлением в водопроводной сети, которое подразумевает поддержание оптимального уровня давления в сети.

2. Активный контроль утечек, который предусматривает выявление скрытых утечек или угрозы их возникновения.

При создании АСУТП «Акватория», которая представляет собой интеллектуальную систему диспетчеризации и оптимизации режимов работы системы водоснабжения оба эти направления были реализованы.

Так по результатам внедрения системы была подтверждена необходимость адаптивного регулирования выходного давления станций в функции давления в диктующих точках, и с учетом фактического режима водопотребления [3].

Объем потерь воды от конкретной утечки, зависит от двух факторов – ее интенсивности (м^3/ч) и ее длительности. Согласно [2], длительность состоит из трех слагаемых: времени выявления факта возникновения утечки, времени локализации места ее возникновения, а также времени ее ликвидации. Однако в случае скрытой утечки, когда вода не выходит на поверхность, время обнаружения факта ее возникновения может быть весьма значительным.

Традиционно возникновение порыва с помощью систем автоматики, детектируется на насосной станции по увеличению показаний расходомера

воды, снижению выходного давления ниже заданного уровня, увеличению потребляемой мощности. Однако, не всегда эти показатели могут оперативно выявить аварию, в случае, когда интенсивность потерь воды не высокая. Так станция может продолжать поддерживать требуемое давление, расход не будет превышать пикового значения.

Для реализации системы диагностики возникновения утечек, в частности порывов были использованы методы прогнозирования на базе нейронных сетей. Основная задача системы на основании данных о режимах работы насосной станции определить факт возникновения порыва в зоне ее обслуживания.

В основе предложенного подхода – получение с помощью нейронной сети прогноза водопотребления станции и непрерывное сравнение фактического расхода воды и прогнозного. В случае обнаружения отклонения, далее выполняется дополнительная проверка по изменению потребления энергии и выдается уведомление диспетчеру.

Опыт эксплуатации данного решения показал, что использование в качестве инструмента прогнозирования нейронных сетей имеет ряд преимуществ.

1. Высокая автоматизация процесса диагностики, за счет того, что нейронная сеть обучается на реальных процессных данных со станции, затем сама производит проверку достоверности прогнозирования на контрольном отрезке времени, и в случае успешного обучения, переходит в режим диагностики аварий.
2. Возможность учета при прогнозировании большого количества влияющих параметров (давления на выходе станции, давления в контрольной точке, сезонности, типа дня недели и т.д.)
3. Возможность сети постоянно улучшать качество прогнозирования, путем автоматического «дообучения» в процессе эксплуатации.

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]: Водопотребление. – Режим доступа: https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-excel/Ekolog_sistema/C3_1990_2019.xlsx– Дата доступа 13.03.2021
2. EU Reference document Good Practices on Leakage Management. [Electronic resource] – https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3ff6a13c-d08a-11e5-a4b5-01aa75ed71a1/–Date of access: 12.03.2021.
3. Здор, Г. Н. Снижение энергозатрат повысительных насосных станций путем исключения завышенного давления в водопроводной сети / Г. Н. Здор, А. В. Синицын // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 4. - С. 44-53.

УДК 621.865.8

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА UR3

Околов А.Р., Матрунчик Ю.Н., Абуфанас М.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Промышленные роботы (ПР) находят все более широкое применение, заменяя человека на участках с опасными, вредными для здоровья, тяжелыми или монотонными условиями труда.

Особенно важно то, что ПР можно применять для выполнения работ, которые не могут быть механизированы или автоматизированы традиционными средствами. Однако ПР — всего лишь одно из многих возможных средств автоматизации и упрощения производственных процессов. Они создают предпосылки для перехода к качественно новому уровню автоматизации — созданию автоматических производственных систем, работающих с минимальным участием человека.

Учебно-методический комплекс на базе коллаборативного робота UR3 позволяет проводить обучение и научно-исследовательскую работу студентов, магистрантов и преподавателей в области автоматизации технологических процессов и производств.

Структура комплекса обеспечивает последовательный переход от простого к сложному, используя открытые кросс-платформенные средства технологического программирования промышленных роботов и доступные компоненты периферийных устройств автоматики.

UR3 — это небольшой коллаборативный робот компании Universal robots (Дания), который подходит для выполнения легких сборочных операций и автоматизации рабочих мест.

Коллаборативный настольный робот можно также использовать в оптимизированных производственных потоках в виде смонтированной на столе отдельной рабочей станции для перекладки деталей, выполнения сборочных операций. Заменяя захватное устройство на другой какой-либо инструмент или оснастку, можно использовать данный робот как основное технологическое оборудование в операциях шлифовки, полировки, сварки и т.д. Компактность и простое программирование позволяют перенастраивать робота для выполнения разных задач на гибком производстве и в учебном процессе.

Продукция компании «Universal Robots» представлена линейкой из трех облегченных промышленных манипуляционных устройств с разомкнутой кинематической цепью: UR3, UR5, UR10.

На рисунке 1 показан пример построения модели РТК в лабораторных условиях для проведения занятий со студентами. Коллаборативность данного типа робота обеспечивает безопасную работу и обучение

учащихся с максимально приближенными к производственным условиям эксплуатации.

Рисунок 1 – Учебный робототехнический комплекс на базе ПР UR3

Основными целями учебно-методического комплекса являются: Изучение конструкции ПР UR3, блока управления и сенсорного монитора. Изучение основных характеристик ПР UR3. Создание простой программы перемещения по точкам. Изучение возможности построения траектории движения манипулятора с различной интерполяцией в системе декартовых координат. Ознакомление с возможностями использования дополнительных команд PolyScope для создания условных переходов, циклов, подпрограмм. Изучение понятия переменная (локальная, глобальная), установка исходных значений переменных, структура программы. Ознакомление с возможностями работы ПР UR3 в различных системах координат (Основание, Инструмент, Вид, Плоскость_1). Изучение возможности команды «Платформа» и «Шаблон» для циклического периода между положением в программе робота. Изучение возможности команды Поиск (Укладка/Раскладывание).

Применение современных промышленных роботов увеличивает производительность оборудования и выпуск продукции, улучшает качество продукции, заменяет человека на монотонных и тяжелых работах, помогает экономить материалы и энергию. Кроме того, они обладают достаточной гибкостью, чтобы использовать их при выпуске продукции средними и малыми партиями.

1. Шурков, В. Н. Основы автоматизации производства и промышленные роботы. Учебное пособие: моногр. / В.Н. Шурков. - Москва: Мир, 2010. - 240 с.
2. Коллаборативные промышленные манипуляторы [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.universal-robots.com/ru/.

УДК 621.865

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ СКЛАД ЛИСТОВОГО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Алдакушин А.Г.[1], Tobola P.[2]
1). Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь
2). Ceske Vysoke Uceni Technicke v Praze
Прага, Чешская Республика

В последнее время на производствах, связанных с переработкой листового материала типа ДСП, OSB и им подобных, получили распространение автоматизированные склады исходного материала с использованием в качестве складирующего оборудование роботизированных ячеек портального типа. Яркими примерами организации таких складов могут служить технологические решения фирмы BIESSE (Италия).

Однако общим недостатком такого исполнения роботизированных складов является ограничение оперативной зоны одного робота допустимым габаритом пролёта его портала. С учетом стандартно принятых размеров исходного материала – 2750x1830 мм для ДСП и 2500x1250 мм для OSB по Евростандарту EN300:2006 – рабочая зона одной роботизированной ячейки не превышает 6x15 м при планарном стапельном размещении складируемого материала. Исключая из этой зоны места приемки из транспорта и выдачи материала на технологическую линию, объем номенклатуры хранимого в одной ячейке материала не превышает 12 наименований. При этом цеха мебельной промышленности работают с каталожной номенклатурой листов ДСП насчитывающей до 60 наименований, а цеха по производству строительных деталей из OSB-плит до 20 наименований в объеме заказа по одному проекту. Выходом в таком многономенклатурном производстве является использование нескольких портальных роботизированных ячеек, что приводит к значительному удорожанию такого производства, при одновременном снижении коэффициента использования каждой единицы складского оборудования.

В ходе разработки авторами аванпроекта автоматического цехового склада листовых древесно-полимерных материалов с планарным расположением мест хранения на номенклатуру единиц складирования до 36 наименований был предложен вариант использования в качестве оператора склада мобильного робота с колесным приводом перемещения (робокар) «козлового» типа, оснащенного манипулятором типа «SCARA» с кинематической схемой с горизонтальными осями. Грузоподъемное устройство робота выполняется в виде рамного вакуумного схвата. Расчетная грузоподъемность составляет 80 кг.

Планировочно склад представляет собой крытое пространство, на полу которого располагаются стапели складируемого материала. К месту складирования пакеты листового древесно-полимерного материала доставляются цеховым транспортом. Укладка пакетов материала выполняется без жесткой привязки позиции. Требуется только соблюдение обозначенных на полу зон проезда для робота-оператора. Рядом со стапелем материала устанавливается RFID –маяк с идентификационной меткой, содержащей информацию о данном типе единицы хранения.

Конструктивно робот-оператор выполнен в виде транспортной автоматической четырехколесной тележки с системой триангуляционного позиционирования по лазерным дальномерам. При этом двухточечный сканер, расположенный в верхней части конструкции робота, позволяет рассчитывать его позицию, как по координатам, так и по углам ориентации в пространстве цеха. Точное позиционирование относительно стопы складируемого материала реализуется телевизионной системой из трех камер, обеспечивающих проекционное изображение предмета манипулирования в системе координат робота-оператора. Каждое колесо тележки имеет управляемый электропривод вращения и привод поворота вокруг вертикальной оси. Тем самым достигается абсолютная управляемость тележки, включая развороты на месте и перемещение под любым углом к базовым координатам пространства. Габаритное расположение колес транспортной тележки позволяет ей перемещаться над стапелями складируемого материала по боковым проездам. Вдоль вертикальной оси по центру транспортной тележки на «козловой» раме расположен манипулятор типа «SCARA» имеющий горизонтальные оси вращения суставов. Такой тип манипулятора позволяет иметь значительное вертикальное перемещение рабочего схвата, которое в разрабатываемом проекте составляет 1200 мм.

Особенностью проекта является система корректировки роботом позиции захваченного материала за счет определения смещения его центра тяжести относительно вертикальной оси робота. Правильная геометрия листов материала позволяет судить о теоретически верном положении их центра тяжести с высокой степенью точности. Фактическое же расположение центра тяжести при захвате листа материала определяется при помощи системы из 4-х тензодатчиков. Рассогласование показаний значений веса от каждого из них служит исходными данными, на основании которых система управления рассчитывает величину требуемой корректировки позиции приводами робота-оператора. Отработка этих значений рассогласования позволяет укладывать лист материала на приемную позицию с требуемой точностью без использования других механизмов.

УДК 621.876.11-049.3

ЛАБОРАТОРНЫЙ УЧЕБНЫЙ КОМПЛЕКС «ЛИФТ»

Беленков М.А., Громыко В.А., Лившиц Ю.Е.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

С целью получения практических навыков работы со сложными техническими объектами разработан макет лифта, в котором реализованы основные функции реального объекта.

Он состоит из модели лифта с датчиками положения кабины, системы управления на базе программируемого логического контроллера и пульта, привода кабины (асинхронный трехфазный двигатель управляемым преобразователем частоты)

В СУ используется ПЛК FATEK FBs-20MAR2-AC, в котором по сигналам с пульта управления и датчиков положения кабины лифта, реализован алгоритм управления комплексом. Для поддержания необходимых скоростей перемещения кабины в шахте макета, приводящейся в движение асинхронным двигателем, используется ПЧ YSKAWA V1000 настроенный на нужные режимы работы.

Макет лифта представляет собой каркас из алюминиевого профиля. Он имеет по бокам направляющие для перемещения кабины и противовеса, которые связанны между собой тросом. У основания кабины расположен магнит, активирующий датчики положения (герконами). В машинном отделении закреплен мотор, осуществляющий движение троса (рисунок 1).

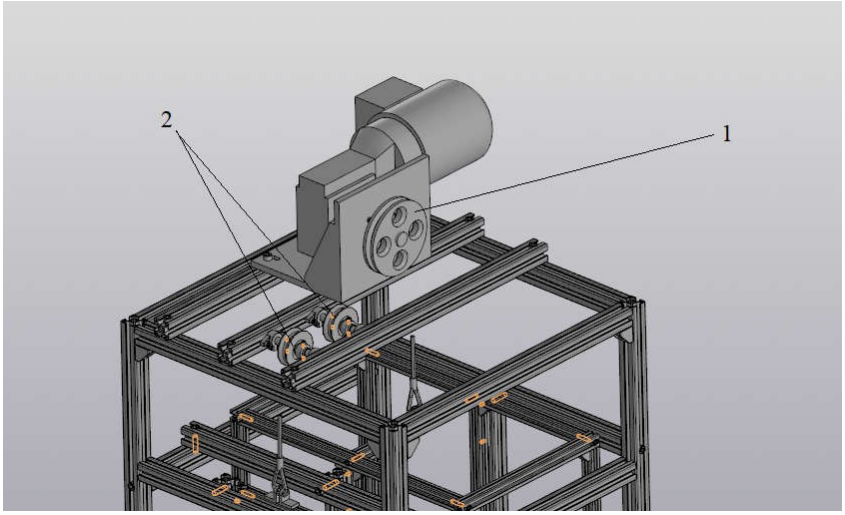


Рисунок 1 – Машинное отделение

Канатоведущий шкив образуют три ролика: 1 – ведущий, 2 – паразитные; на которых расположен трос, соединяющий кабину и противовес.

УДК 621.77

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

Белявин К.Е., Щукин В.Я., Кожевникова Г.В., Кожевников Д.А
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Экспериментальные методы определения пластических свойств металлов и сплавов можно подразделить на экспериментальные деформационные и экспериментальные физические. В деформационных методах образец пластически деформируют до разрушения в условиях постоянной температуры и постоянной скорости деформации. В момент разрушения фиксируется накопленная деформация в виде:

– относительного удлинения после разрыва:

$$\delta = \frac{l_К - l_Н}{l_Н} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $l_Н$ – длина рабочей части образца в начальном состоянии, мм; $l_К$ – длина рабочей части образца в конечном состоянии при разрушении, мм;

– относительного сужения поперечного сечения после разрыва:

$$\psi = \frac{F_Н - F_К}{F_Н} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $F_Н$ – площадь поперечного сечения образца в начальной стадии испытания, мм^2; $F_К$ – площадь поперечного сечения образца в конечной стадии испытания при разрушении, мм^2;

– степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \int_0^t H dt, \quad (3)$$

где H – интенсивность скоростей деформации сдвига, с$^{-1}$; t – время, с.

Пластичность металла определяется параметром: максимальный остаточный сдвиг γ_{max}:

$$\gamma_{max} = \mathrm{arctg}\left(\frac{\varphi_{max} \cdot D}{2l}\right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где φ_{max} – максимальный угол закручивания образца на его расчетной длине, рад; D – диаметр рабочей части образца, мм; l – расчетная длина образца, мм.

Показатели (1) и (2) используются в испытаниях на растяжение и сжатие. Показатель (3) – универсальный для всех видов испытания и по этой причине наиболее предпочтительный.

Идеальными условиями испытания являются такие, в котором в ходе всего испытания остаются постоянными не только температура и скорость деформации но и напряженное состояние: среднее напряжение σ/К и показатель третьего инварианта тензора напряжений $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}$/К, а также схема деформации: однонаправленная монотонная, разнонаправленная монотонная, разнонаправленная немонотонная с постоянным показателем

разнонаправленности. К сожалению, не всегда удается выдержать эти идеальные условия и в этом случае прибегают к отнесению результатов исследования к среднему значению непостоянного параметра в ходе эксперимента. Следует также учитывать, что в большинстве испытаний не учитывается неравномерность распределения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. В этом случае эксперимент определяет пластичность металла, усредненную по объему образца. В тоже время испытание методом поперечной прокатки позволяет определять пластичность локально – строго вдоль центральной оси образца.

Методом конечных элементов решена осесимметричная задача (3D) растяжения цилиндрического образца с концентратором. Впервые показано, что среднее напряжение увеличивается от поверхности до центральной оси образца до 3 раз, параметр третьего инварианта тензора напряжений увеличивается в том же направлении до 7 раз, накопленные деформации, наоборот, в указанном направлении уменьшаются на 25%.

Методом графического построения полей линий скольжения получено решение (2D) растяжения листа с концентратором напряжений. Впервые показано, что среднее напряжение возрастает от поверхности листа до его центральной части в 2,7 раза, параметр третьего инварианта тензора напряжений возрастает от 0 до 2,6. Точность решения по отношению к литературным источникам увеличена в 1,4 – 5 раз.

Впервые разработан новый метод экспериментального определения пластических свойств металлов и сплавов поперечной прокаткой дискообразного образца с осевыми отверстиями. Метод поперечной прокатки дискообразного образца позволяет локально (то есть строго по оси заготовки) определить пластичность металла, и тем самым гарантировать процесс изготовления детали методом поперечно-клиновой прокатки без вскрытия осевой полости. Точность данного метода, как показали исследования, превосходит точность широко применяемого метода растяжения цилиндрического образца. Достоинством данного метода является то, что вскрытие полости определяется визуально на торцевой поверхности образца после определенного количества циклов нагружения. Параметры напряжений и деформаций при прокатке дискообразного образца определяют методом конечных элементов с применением вычислительной техники, поскольку задачи 3D аналитически решать не удается.

Методом конечных элементов определены параметры напряженно-деформированного состояния на оси образца – в месте, где происходит разрушение металла при прокатке. Новый метод позволяет расширить область испытания пластических свойств металлов по среднему напряжению в 10 раз, по параметру третьего инварианта тензора напряжений в 8 раз.

УДК 621.81:004

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Лившиц Ю.Е., Савёлов П.И.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Традиционные способы проектирования, в том числе интуиция конструктора, не позволяют в полной мере реализовать в разрабатываемых конструкциях преимущества новых технологий, которые обеспечивают практически безграничные возможности конструктивных решений. Одним из самых эффективных методов оптимизации конструкций является топологическая оптимизация, при помощи которой рассматриваются различные варианты геометрии конструкции, и при этом улучшить её физико-механические свойства – уменьшить массу, повысить жёсткость и т.д. В результате применения такого метода возможно разработка конструкций уникальной сложной конфигурации, производство которых возможно только при помощи аддитивных технологий.

Нами была разработана конструкция мобильной солнечной электростанции (МСЭ) [1]. Одним из основных требований к мобильным устройствам является минимальные массогабаритные параметры.

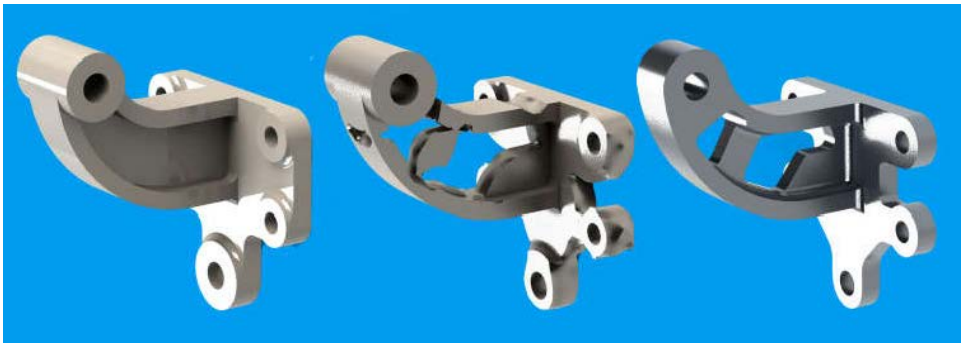
Целью работы является применение генеративного проектирования при оптимизации топологии несущих конструкций и отдельных деталей мобильной солнечной электростанции для существующих и перспективных методов аддитивного производства.

Задача топологической оптимизации реализовалась на примере нахождения оптимального, с точки зрения жёсткости, распределения материала в кронштейне крепления дополнительной опоры МСЭ.

Для реализации данного метода оптимизации необходимо определение частных производных целевой функции по переменным проектирования. Процесс изменения конструкции и структуры детали, с учётом варьирующегося параметра (объём материала детали), при заданном критерии оптимальности – масса детали и величина допустимых эквивалентных напряжений при заданных эксплуатационной нагрузке 250 Н.

Генеративное проектирование проводилось при помощи САПР SolidWorks, в процессе которого определялось наилучшее распределение материала в пределах заданной цели и системы ограничений (запас прочности 40 % относительно предела текучести материала).

Результаты оптимизации конструкции кронштейна (рис. 1а) представлены на рисунке 1б. Применение генеративного проектирования позволило определить новую конфигурацию детали со сниженной массой на 30 %.



а б в

Рисунок 1 – Оптимизация кронштейна крепления

Модели, разработанные при помощи топологической оптимизации, можно экспортировать как STL-файлы для дальнейшего изготовления при помощи аддитивных технологий. Однако геометрия оптимизированной модели рисунок 1б является неудобной с точки зрения эксплуатации и её эстетического восприятия. Поэтому, окончательная конфигурация кронштейна (рис. 1в) была доработана с точки зрения придания форме детали аналогичной классическим методам изготовления.

Для верификации разработанной модели проведены компьютерные исследования величины максимальной деформации и эквивалентных напряжений при эксплуатационной нагрузке (рис. 2).

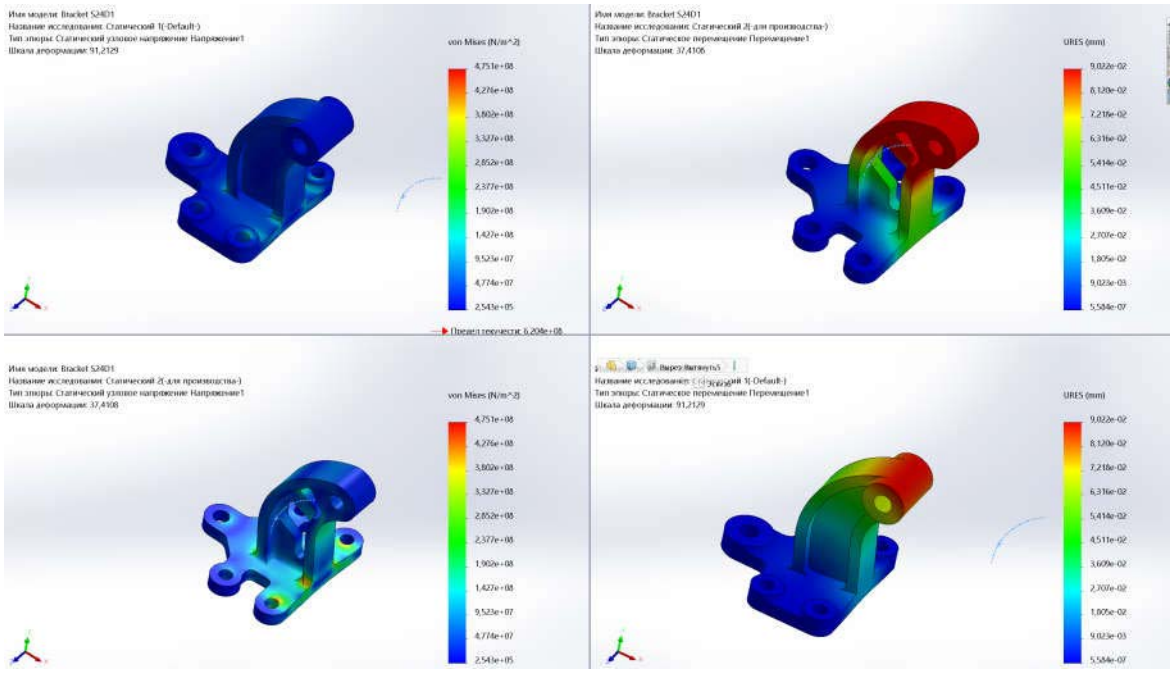


Рисунок 2 – Результаты компьютерных исследований

Установлено, что максимальные величины эквивалентных напряжений и деформации оптимизированной конфигурации кронштейна не превышает допустимые.

1. Савёлов, П.И. Разработка конструкции мобильной солнечной электростанции / П.И. Савёлов, Ю. Е. Лившиц // Доклады БГУИР – Минск, 2020; 18(3) – С 57-62. DOI:10.35596/1729-7648-2020-18-3-57-62

УДК 631.171: 378

ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРОВ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Гируцкий И.И.
Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Республика Беларусь

К элементам пятого (ныне действующего) технологического уклада относят следующие отрасли:…, вычислительную технику, программное обеспечение, телекоммуникации, информационные услуги и др. Ядром формирования нового уклада можно назвать биотехнологии, космическую технику, тонкую химию, микроэлектронные компоненты. Основными преимуществами данного технологического уклада по сравнению с предыдущим (четвертым) укладом являются: индивидуализация производства и потребления, эффективное энерго- и ресурсопотребление на основе автоматизации производства.

Известная аксиома успеха в век научно-технического прогресса, заключающаяся в решении двуединой задачи – разработке новых технологий и быстрому внедрению их в производство, делает обязательной интеграцию науки (разработка) и образования (обучение грамотному использованию новых технологий). Такой подход требует достаточно сложных и длительных, не только структурных, но и психологических изменений в нашей сложившейся системе практически независимого функционирования науки, образования и производства.

Для учебно-научного процесса агроинженерного университета кардинальные изменения в технологиях управления и робототехники должны сопровождаться адекватным развитием соответствующей лабораторной базы. От своевременности проведения модернизации лабораторий программно-технических средств автоматизации и переподготовки профессорско-преподавательского состава существенно зависит качество агроинженерного образования, востребованность выпускников и, в значительной мере, эффективность использования новых технологий управления на предприятиях агропромышленного комплекса. На кафедре автоматизированных систем управления создана лаборатория для практического обучения студентов.

Первоочередные задачи, решаемые при развертывании полигона программно-технических средств автоматизации производства:

- формирование информационной и программно-технической среды для подготовки специалистов, проведения научных исследований и разработки проектов в области автоматизации производства по принципу «снизу-вверх», от изучения отдельных датчиков и исполнительных механизмов, до создания локальных автоматизированных систем управления отдельными технологическими процессами и установками;

- разработка методического обеспечения для обучения новым технологиям управления в рамках учебно-научного процесса агроинженерного университета, включая курсовое и дипломное проектирование, подготовку кандидатов и докторов наук, а также для повышения квалификации сотрудников научно-исследовательских и проектных организаций и специалистов агропромышленных предприятий;

- выполнение исследований и разработка прикладного программного обеспечения под новые функциональные задачи с целью повышения эффективности автоматизированного управления технологическими процессами и производствами на базе робастных, адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления.

Решение таких взаимосвязанных задач направлено на освоение современных технологий автоматизированного управления и робототехники в учебно-научном процессе агроинженерного университета [1,2].

В качестве программно-аппаратной базы лаборатории приняты учебные стенды «Станция водоснабжения» и «Мехатроника» фирмы Festo. В качестве устройства управления используется ПЭВМ с лицензионной системой программирования FluidSIM®. Стенды и методическое обеспечение развивают практические навыки последовательного построения систем автоматизации от отдельных датчиков и исполнительных механизмов до создания комплексных проектов. Стенды позволяют изучить принципы действия и исследовать статические и динамические характеристики таких средств измерения как оптические, индуктивные и емкостные датчики конечного положения, ультразвуковой датчик уровнемер, датчики давления и расхода, а также современные исполнительные механизмы и элементы программирования.

Таким образом, в БГАТУ создана прекрасная программно-техническая база для инновационной подготовки активных специалистов в области построения современных систем управления производством. Разнообразные датчики и исполнительные механизмы, микропроцессорные контроллеры и компьютеры в промышленном исполнении и основанные на нем системы автоматизации различных уровней становятся необходимым элементом успешно функционирующего производства. Темпы этих перемен зависят от качества подготовки будущих специалистов.

1. Гируцкий, И.И. Подготовка специалистов по автоматизированным системам управления для предприятий АПК/ И.И. Гируцкий// Вышэйшая школа. №2, 2002 г., с.-21-24.

2. Гируцкий И.И. , Загинайлов В. И., Судник Ю.А. Инновационная технология подготовки специалистов по компьютеризации сельхозпроизводства. Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 8, 2005.-с.2-4.

УДК 62-83-52:681.325.5

КОНСТРУКТИВНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ 3D ПРИНТЕРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SCARA

Гурский Н.Н., Артющик В.С., Корольчук О.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Рассматривается модернизированная конструктивная схема 3D принтера на основе модели Scara (рис.1), манипуляционный механизм которого в отличие от механизма, рассмотренного в [1], управляется в вертикальном направлении электрическим приводом, расположенным не в основании конструкции, а в конечном звене манипулятора (плече).

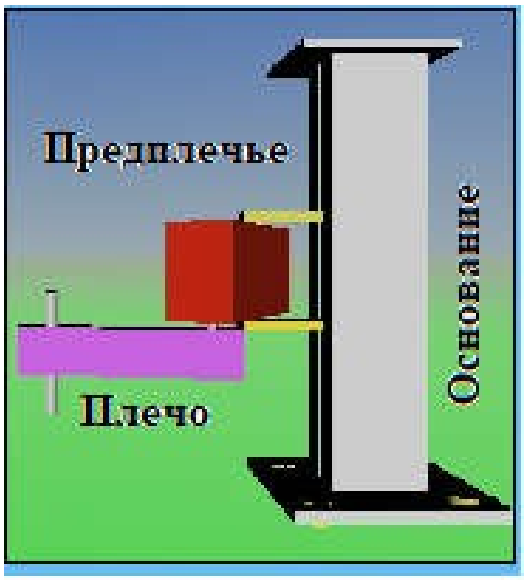


Рис.1. Конструктивная схема 3D принтера на основе модели Scara

Для реализации вертикального движения плечо конструктивно выполнено виде параллелограмма.

Известно, что математическая модель такого принтера базируется на прямой и обратной задачах кинематики двухзвенного манипуляционного механизма, позиционирующего рабочий орган принтера в заданную точку трехмерного пространства.

Чтобы реализовать позиционирование рабочего органа с учетом трансформации параллелограммного плеча, в работе приведены необходимые математические соотношения и показано функционирование 3D принтера под управлением микроконтроллера Arduino.

1. Гурский, Н.Н. Управление мехатронной системой на базе многозвенных роботов-манипуляторов / Н.Н. Гурский, Ю.А. Скудняков, В.С. Артющик, А.Н. Безручко // Наука и техника. Международный научно-технический журнал. Том 18, №4. – Минск, 2019. – С. 350-354.

УДК 539.3

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ НАДЕЖНЫХ, ДОЛГОВЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНО- И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Василевич Ю.В.[1], Федотов Д.А.[2], Неумержицкая Е.Ю.[3], Беляцкая Л.Н.[1], Чигарев В.А[1]

1). Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь;

2). ОАО «Авангард», Сафоново, Российская Федерация;

3). Академия последипломного образования Минск, Республика Беларусь.

Перемены, происходящие в последние годы в экономике, промышленности и общественной жизни, поставили перед учеными и исследователями ряд научно-исследовательских задач, для успешного решения которых востребованы конструкционные материалы с высокими эксплуатационными свойствами и новыми функциональными возможностями. Важнейшее место среди этих материалов занимают полимерные композиты, состоящие из двух и более химически разнородных материалов, образующих единое целое [1-5].

В настоящее время широко применяются композиционные материалы, армированные стеклянными, углеродными, борными и другими видами волокон, обладающие удельной прочностью в несколько раз превышающей прочность стали и многих металлических сплавов. Композиционные материалы также обладают высокой коррозионной стойкостью, электро-, радиотехническими и другими свойствами, работают в экстремальных условиях с жесткими весовыми ограничениями и повышенными требованиями к надежности, и поэтому расширяется их внедрение в различные области техники, такие как машиностроение, авиастроение, приборостроение и др.

Каждый цикл переработки полимерно-композиционных материалов при изготовлении изделий можно разбить на этапы, для каждого из которых в выполненной работе принята соответствующая модель среды, учитывающая структурную неоднородность материала. Предложенные модели сред основываются на информации о свойствах компонентов композита и их взаимодействии. Так, технология изготовления изделий в форме тела вращения начинается с намотки пропитанной ткани на оправку и заканчивается снятием с оправки изделия, прошедшего этапы разогрева, полимеризации и охлаждения. На этапе намотки основным видом нагружения является натяжение ткани при намотке. Этап разогрева – это действие градиента температуры. Этап полимеризации характеризуется химической усадкой связующего. Этап охлаждения сопровождается термической усадкой композита.

Отметим, что постановки решаемых задач исходят из нужд производства изделий из композитов. Необходимость выделения этапа охлаждения цилиндрической оболочки из технологического цикла при ее изготовлении возникла по причине влияния термической усадки компонентов композита на остаточные напряжения в композите. Компоненты композита – связующее и наполнитель – имеют разные коэффициенты температурного расширения при действии температурного градиента. При этом, деформация компонентов композита должна быть такой, чтобы она не приводила к появлению расслоений, трещин и других причин, приводящих к нарушению монолитности. Таким образом, процесс охлаждения цилиндрической оболочки должен исходить из условий равновесия и совместности деформаций наполнителя и связующего.

Разработан метод и выполнен численный расчет напряженного состояния в цилиндрической оболочке из композита в результате химической усадки связующего и температурных напряжений с использованием структурной неоднородности композиционного материала. Проведено сравнение полученных результатов решения температурной задачи с классическим решением В.В. Болотина [2], выполненного на основе замены структурно неоднородного материала локально однородным. Показано, что эти решения отличаются незначительно, т.е. приводят к практически одинаковым результатам. Использование нового разработанного метода позволило намного упростить решение поставленной задачи по определению радиальных и окружных напряжений на этапе охлаждения композиционного цилиндра. В качестве исходных данных взяты механические характеристики связующего и наполнителя, геометрические размеры оболочки, температура, закон Гука и др.

1. Василевич Ю.В., Горелый К.А., Сахоненко С.В., Сахоненко В.М., Малютин Е.В. Механика препрегов – расчет изделий из армированных композиционных материалов. - БНТУ, 2016. – 593с.

2. Болотин В.В., Болотина К.С. Механика полимеров. - №1,1967. С. 136–141.

3. Рогинский С.Л., Канович М.З., Колтунов М.А. Высокопрочные стеклопластики. - М.: Химия, 1979. – 144 с.

4. Киселев Б.А. Стеклопластики. – М.: Гос. науч.-технич. изд-во хим. лит-ры, 1961. – 240 с.

5. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. – М.: Химия, 1970. – 482 с.

УДК 62-757.75

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ И ЗАЩИТЫ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ОТ КОРРОЗИИ

Качанов И. В., Ключников В. А., Шаталов И. М., Ковалевич В. С.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

В настоящее время речной флот Республики Беларусь имеет на балансе десятки самоходных судов. Основным типом движителя судов технического флота и пассажирских теплоходов является гребной винт, выполненный из стали.

На разрушение гребных винтов оказывают влияние такие факторы, как коррозия, эрозия, кавитация, усталость, механические повреждения и другие факторы. Эти виды разрушения гребных винтов приводят к потере хода судна, а иногда и к аварийным последствиям. Самым распространенным и опасным разрушительным действием обладает коррозия. Коррозии обычно подвергаются гребные винты из углеродистой стали. Срок службы таких винтов незначителен и, по истечении 1,5-2,5 лет они подлежат ремонту либо замене, что приводит к значительным убыткам. Подобное влияние коррозии сказывается и на винты из чугуна. Коррозионно-эрозионные разрушения гребных винтов происходят довольно быстро на начальных этапах с мелких разъеданий лопастей как на нагнетающей, так и на засасывающей поверхностях. Разрушения распространяются на значительную площадь лопасти, имели место случаи, когда поверхности лопастей превращались в "губчатую поверхность" и из-за потери прочности отваливались. Недостаточно эффективные способы очистки, а также отсутствие технологии профилактической обработки лопастей гребных винтов делают актуальным создание новой реверсивно-струйной технологии очистки и защиты от коррозии лопастей гребных винтов.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ показали, что весьма экономично можно удалять с металлических поверхностей продукты коррозии, используя новую технологию реверсивно-струйной очистки (РСО) [1–5]. В основу технологии РСО положен физический принцип, заключающийся в том, что струя рабочей жидкости (пульпа на основе речного песка либо бентонитовой глины) при соударении с очищаемой поверхностью разворачивается на 180º, что приводит к усилению струйного воздействия на очищаемую поверхность в 1,5-2 раза за счет возникновения реактивной составляющей [2]. Для обеспечения отмеченного разворота струи была разработана оригинальная конструкция устройства, отличающаяся патентной новизной [3, 4]. Одним из основных элементов в этой

конструкции является струеформирующее сопло, имеющее форму конфузора.

Проведенные теоретические исследования позволили получить зависимость для расчета оптимального угла конусности конфузора при турбулентном режиме движения со значениями чисел Рейнольдса $2300 < Re < \infty$ с учетом влияния плотности рабочей жидкости, ее динамической вязкости, средней скорости движения рабочей жидкости, радиуса конфузора, а также от коэффициента эквивалентной шероховатости, т.е. от постепенного износа канала конфузора.

Процесс очистки поверхности гребного винта разделен на несколько этапов. В состав рабочей жидкости на первом этапе очистки входит речной песок с размером фракций 0,10-0,63 мм с высокой степенью абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность и полиакриламид. На втором этапе с целью создания на поверхности гребного винта защитного пленочного покрытия в состав рабочей жидкости входит бентонитовая глина с концентрацией 2-5 % от общего объема.

Технология реверсивно-струйной очистки позволяет поддерживать судоходные качества гребного винта вследствие повышения эффективности его очистки, а также многократно продлить срок эксплуатации благодаря профилактической обработке лопастей.

1. Способы очистки металлических поверхностей: пат. №21512, Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/04 / И.В. Качанов, А.Н. Жук, А.В. Филипчик, А.С. Исаенко; дата публ. 30.12.2017.

2. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии перед лазерной резкой: пат. №21455, Респ. Беларусь, МПК В08В 3/02; 13 08В 3/04 / И.В. Качанов, А.Н. Жук, А.Н. Яглов, А.В. Филипчик; дата публ. 30.10.2017.

3. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат. №16526, Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/00; В 63В 59/08 / И.В. Качанов, А.Н. Жук, В.Н. Шарий, Р.О. Мяделец; дата публ. 30.10.2012.

4. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат №19543, Респ. Беларусь, МПК В 63В 59/08 / И.В. Качанов, А.Н. Жук, И.М. Шаталов, В.Н. Шарий; дата публ. 30.10.2015.

5. Качанов, И.В. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И.В. Качанов, А.В. Филипчик, В.Е. Бабич, А.Н. Жук, С.И. Ушев – Минск: БНТУ, 2016. – 168с.

УДК 621.77

НОВЫЕ СПЛАВЫ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Кожевникова Г.В., Щукин В.Я., Дубенец С.С.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Снижение веса электромобиля может быть достигнуто за счет существенного повышения механических свойств поковок: предела прочности, ударной вязкости, усталостной выносливости, ресурса пластичности и износостойкости. Повышение качественных показателей поковок и снижение веса электромобилей приведет к повышению безопасности поездки на электромобиле, увеличению длины пробела электромобиля с одной зарядки, снижению себестоимости поездки, снижению затрат на ремонты, повышению конкурентоспособности отечественного электромобиля.

В качестве объектов исследования намечены два материала с высокими механическими свойствами: титановый сплав ВТ9 и чугун ADI. Оба материала применяются в мировой практике, но из-за относительно высокой стоимости в Республике Беларусь они почти не используются. Более того в литературных источниках отсутствуют данные по режимам их обработки методами давления. В автомобилестроении титан применяют в конструкциях клапанов, пружин, выхлопных систем, передаточных валов, болтов. Надежность деталей из титана была проверена в течение нескольких лет на гоночных автомобилях. Титановые сплавы по стойкости к коррозии превосходят самые стойкие из имеющихся медных, медно-никелевых сплавов и нержавеющую сталь в 10-20 раз. Благодаря этому свойству можно уменьшить толщину стенки трубы для более быстрой передачи тепла в теплообменных аппаратах. Титановые сплавы также применяются на объектах тепловой и атомной энергетики. По этой причине результаты предлагаемого проекта найдут применение также в иных отраслях белорусской промышленности.

Российскими учеными при растяжении и авторами при поперечно-клиновой прокатке титана ВТ9 получены зависимости относительного удлинения δ и коэффициента роста пластичности n от скорости деформации ε [1]. Скорость деформации в российских экспериментах была в традиционном для сверхпластичности диапазоне: $\varepsilon = 0{,}05 - 0{,}2\ с^{-1}$. Скорость деформации в белорусских экспериментах была в новом повышенном диапазоне: $\varepsilon = 0{,}95 - 2{,}07\ с^{-1}$. В обоих случаях подтверждено известное положение, что снижение скорости деформации при сверхпластичности повышают пластические свойства металла. Белорусский эксперимент также впервые доказывает наличие эффекта сверхпластичности при высоких скоростях деформации, соответствующих

традиционным промышленным технологиям, в частности поперечно-клиновой прокатке (скорость движения ползуна стана 0,2 м/с).

Ограниченной деформируемости чугун ADI относится к семейству закалённых чугунов. Он широко используется в мире. Термическая обработка с отпуском превращает чугун ADI в материал, имеющий превосходную прочность, жёсткость и стойкость к усталостному разрушению. ADI имеет более высокую удельную прочность, чем алюминий, и износостойкость выше, чем у стали. Прочность на растяжение и предел текучести вдвое превосходят соответствующие параметры обычного ковкого чугуна. Усталостная прочность выше на 50%, она также может быть увеличена дробеструйной обработкой или галтельной прокаткой. Чугун обладает и некоторыми уникальными, присущими только ему особенностями. Наличие графитных включений обеспечивает хорошие антифрикционные свойства, способность быстро гасить вибрации и резонансные колебания, малую чувствительность к надрезам, меньший, чем у стали, удельный вес, повышенную теплопроводность. Для автомобилестроения, на наш взгляд, крайне важны две характеристики чугуна: меньший удельный вес (из-за наличия графитных включений масса одной детали до 10 % меньше аналогичной стальной) и гораздо меньший уровень шума (доказано снижение уровня звукового давления только на одной паре шестерен из чугуна по сравнению со сталью до 2 дБА).

Пластическая деформация металлов и сплавов сопровождается изменением структуры металла, размеров зерен, геометрии границ зерен, ориентации зерен, плотности дислокаций в зависимости от параметров пластического течения: тензоров напряжений и деформаций, тензоров скорости деформации, их инвариантов, температурных полей, видов деформации, нелинейности накопления деформаций, условий трения на контакте заготовки с инструментом. Измененная структура металла определяет его качественные показатели: предел прочности, ударную вязкость, усталостную выносливость, ресурс пластичности, износостойкость, физические и химические характеристики. Научная идея исследования состоит в том, что качественные показатели поковки можно и должно регулироваться параметрами деформации. Улучшение качественных характеристик поковки позволит снизить размеры и вес деталей электромобилей и улучшить ряд его качественных показателей.

1. Кожевникова, Г.В. Деформирование поковок из жаропрочных и титановых сплавов в условиях сверхпластичности / Г.В. Кожевникова, В.Я. Щукин // Актуальные проблемы прочности: материалы междун. международной научной конференции, Витебск, 25–29 мая 2020 г. / под ред. В.В. Рубаника. – Молодечно: Типография «Победа», 2020. – С. 270–272.

УДК 621.7.044

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТЕРЖНЕВОЙ ДЕТАЛИ

Качанов И.В., Власов В.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь;

В последние годы в различных отраслях народного хозяйства находят широкое применение биметаллические материалы, обладающие особыми эксплуатационными свойствами. В настоящее время выпуск биметаллических материалов широко освоен промышленностью. Однако потребность в них все более возрастает, и это особенно относится к новым видам биметаллов из тугоплавких металлов и их сплавов в сочетании с различными сталями и цветными металлами. Биметаллы применяют во многих отраслях промышленности: химической, нефтеперерабатывающей, судостроении, автотракторостроении, в новой технике.

В последнее время в производстве штамповой оснастки у нас в стране и за рубежом, кроме слесарно-механической обработки, используются новые способы изготовления формообразующих деталей: литье, холодное и полугорячее выдавливание, профильное шлифование, порошковая металлургия, электроэрозионная обработка, гальванопластика, плазменное напыление и др [1].

Для экспериментального исследования было проведено выдавливание стержневой биметаллической детали (рис.1).

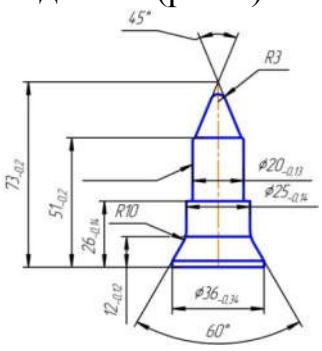


Рис. 1 Чертеж детали «Пуансон» №9783-433.09, из номенклатуры инструментального производства ОАО «МАЗ»

Процесс скоростного горячего выдавливания (СГВ) в режиме ВТМО проходил включая в себя осевое обжатие заготовки, которое сводит к минимуму или совсем исключает отрицательное влияние на пластичность растягивающих напряжений, и вызывают дополнительные напряжения сжатия [2].

На рисунке 2 представлена фотография продольного шлифа биметаллического образца, полученного по технологии СГВ и использованного для морфологического анализа (сечение Б-Б).

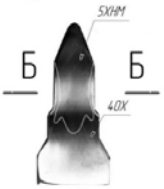


Рис 2- Фотография продольных шлифов образцов, полученных по технологии СГВ и использованных для измерения твердости и микроструктурного анализа в зоне соединения разнородных материалов

Исследование элементного состава проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA Energy 350» фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Погрешность метода в данном случае составляет 3 – 5 относительных процентов (рис.3).

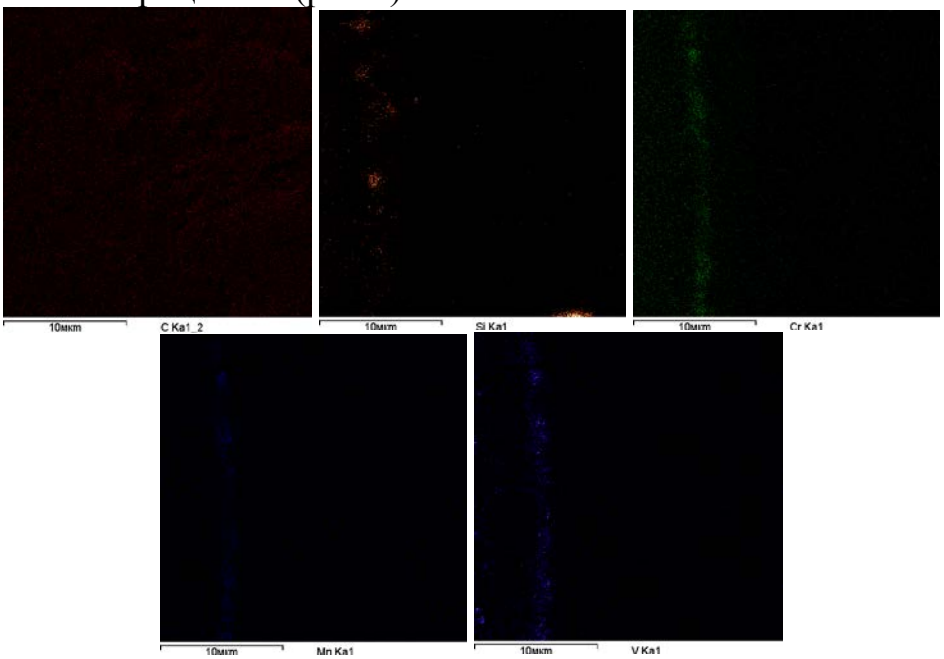


Рис. 3 - Морфология поверхности образца и съемка в характеристическом рентгеновском излучении

Анализ фотографий показывает, что в зоне соединения двух металлов, в биметаллических образцах, происходит переход элементов одного металла к другому. На этих поверхностях не обнаружены окислы и интерметаллидные включения.

1. Качанов И.В., Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Шарий В.Н. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части. Минск, БНТУ, Техническая литература, 2011, 198 с.
2. Качанов И.В., Шарий В.Н., Власов В.В. Скоростное горячее выдавливание в режиме высокотемпературной механической обработки биметаллических стержневых деталей штампов. Литье и металлургия. 2016;(2):93-98.

УДК 004.75

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯ ESP-12

Русак Е.О., Воюш Н.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Интернет вещей – сеть передачи данных между физическими объектами (устройствами), оснащенными встроенными средствами для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Такая сеть может использоваться для построения средств идентификации, средств измерения, средств передачи и обработки данных.

В системе автоматизированного помещения (умный дом) такая сеть может использоваться для организации беспроводных связей между исполнительными устройствами, так как зачастую прокладка проводов невозможна либо затруднена в силу эстетических соображений, а также для организации удаленного мониторинга состояния исполнительных устройств и их управления.

Простым и экономичным способом организации такой сети интернета вещей является модуль ESP-12 с Wi-Fi интерфейсом. В основе модуля лежит 32-битный процессор ESP8266 с тактовой частой 80 MHz и Wi-Fi интерфейсом, который и позволяет модулю получать доступ в интернет. Помимо Wi-Fi интерфейса модуль имеет шины UART, SPI и I2C, что позволяет организовать обмен информацией с другими микроконтроллерами. Также ESP-12 поддерживает 4 режима энергопотребления: обычный – до 100 мА; modem sleep – около 15 мА; light sleep – около 0.4 мА; deep sleep – около 15 мкА.

Так как наибольшее потребление тока идет на поддержание Wi-Fi соединения, режим modem sleep является предпочтительным, так как в этом режиме контроллер отключает Wi-Fi между интервалами маяка DTIM, устанавливаемым маршрутизатором, что позволяет обеспечить длительное время автономной работы модуля.

Для программирования модуля существует несколько способов. ESP-12 поставляется со стандартной прошивкой SDK, позволяющей настраивать модуль при помощи т.н. AT-команд, поданных по интерфейсу UART. Такой метод даже не требует навыков программирования, команды просто подаются на модуль последовательно. Команды могут быть поданы как с другого микроконтроллера, так и с компьютера. В последнем случае понадобится преобразовать интерфейсов USB-UART.

Второй способ – написание собственной прошивки на языке C/C++. Для этого необходимо установить дополнительный набор библиотек для программирования ESP8266 в любую среду программирования микроконтроллеров (напр. Eclipse).

УДК 621.31.83.52

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ СКАЛЯРНОМ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Фираго Б.И., Александровский С.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) используются в различных промышленных установках. Но в большинстве случаев для регулирования скорости двигателей используется зависимое задание частоты питающего двигатель напряжения, т.е. векторное управление. В последнее время наметился определенный интерес к использованию частотно-регулируемых синхронных электроприводов с независимым заданием частоты питающего двигатель напряжения (скалярное частотное управление), поскольку такие электроприводы проще по сравнению с электроприводами с векторным управлением [1].

СДПМ не имеет демпферной обмотки. В этом случае при линейном изменении частоты питающего двигатель напряжения и постоянном статическом моменте электропривод имеет незатухающие гармонические колебания скорости, что не позволяет его применять в установках с постоянным статическим моментом. Если статический момент имеет диссипативный характер, то колебания скорости демпфируются нагрузкой, и можно применять обычное скалярное частотное управление электроприводом на основе СДПМ. Чтобы иметь устойчивую работу синхронного электропривода в установившемся режиме при постоянном статическом моменте, предлагается использовать способ скалярного частотного управления электропривода на основе СДПМ с отрицательной обратной связью по угловому ускорению ротора [2].

Поэтому представляет интерес сопоставить теоретические исследования с экспериментальными результатами. Для осуществления экспериментальных исследований и анализа динамических режимов работы электропривода с СДПМ при скалярном частотном управлении необходимо разработать компьютерную имитационную модель. Для этого широко применяется программный пакет *MATLAB*. При создании модели использовались стандартные блоки библиотеки *Simulink* для управляющей части электропривода и блоки библиотеки *SimPowerSystem* для силовой части. Общий вид имитационной модели представлен на рисунке 1.

Разработанная модель позволяет получить переходные процессы угловой скорости ротора и электромагнитного момента СДПМ при линейном изменении частоты питающего двигатель напряжения. В результате расчетов получены графики для работы электропривода без коррекции колебаний угловой скорости и с использованием обратной связи по угловому ускорению, которые показаны на рисунке 2.

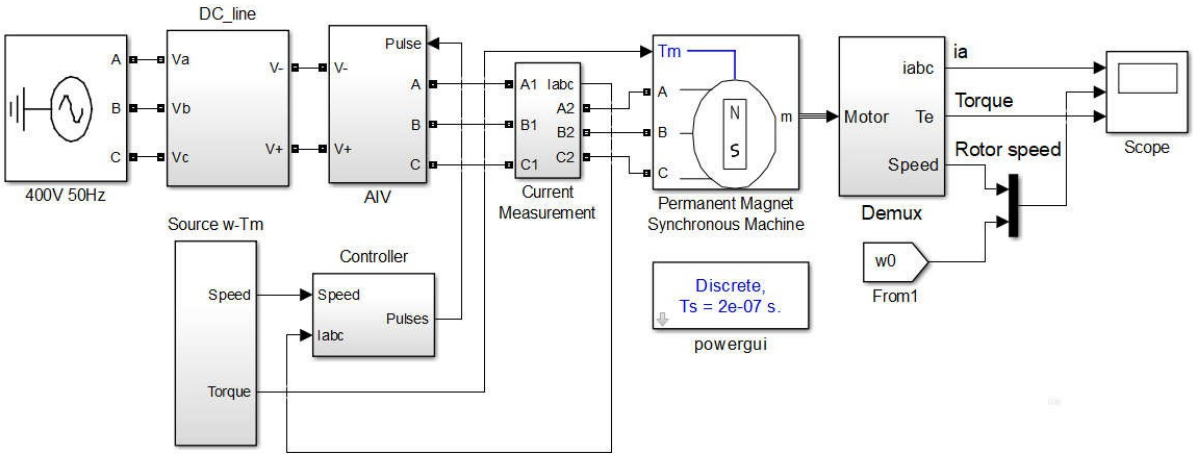
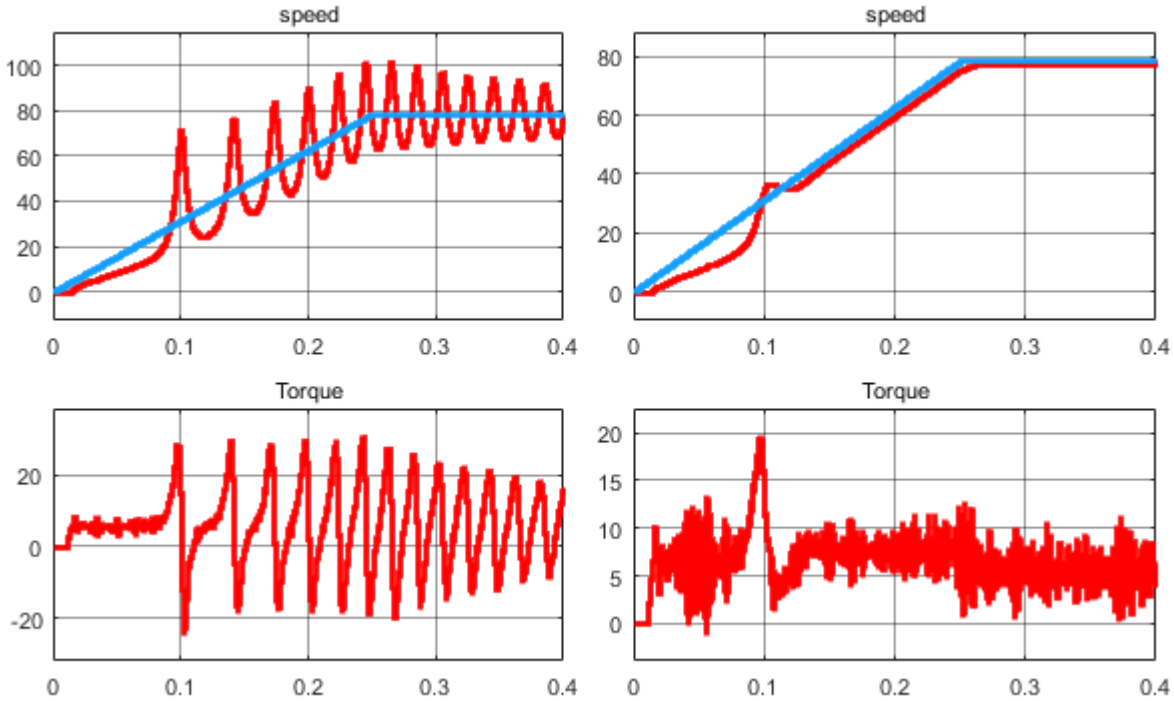


Рис. 1 – Имитационная модель электропривода с СДПМ при скалярном частотном управлении



а б

Рис. 2 – Переходные процесса скорости и электромагнитного момента СДПМ при скалярном частотном управлении без коррекции (а), и с обратной связью по угловому ускорению (б)

1. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363с.
2. Фираго, Б.И. Исследование переходных процессов электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами при линейном изменении частоты питающего напряжения / Б.И. Фираго, С.В. Александровский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2020. - №63(3). – с.197 – 211.

УДК 621.374; 681.84

СПОСОБ СИНТЕЗА ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ХРОМАТИЧЕСКОЙ ГАММЫ ИЗ КОЛЕБАНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Тимошевич В.Б.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время в системах автоматизации и робототехники получили широкое распространение визуальный и аудио-обмен информации между оператором и системой. При аудио-обмене система может распознавать и синтезировать человеческую речь на разных языках. Но синтез осуществляется программно, что делает речь устройства не всегда благозвучной для человеческого уха. Эту ситуацию можно улучшить, используя особенности восприятия звука человеком.

Как известно, тембр человеческого голоса и музыкальных инструментов различается, в том числе, его гармоническим составом. Различие частот сигнала в два раза называется октавой. Однако, нота «ля» первой октавы с частотой 440 Гц будет по-разному звучать у мужчины и женщины, у органа и скрипки. Разложение в ряд Фурье позволяет проанализировать амплитуды и фазы высших гармонических составляющих (обертонов) звукового сигнала, превышающих частоту основного тона в целое число раз. Причем оказывается, что четные обертоны дают мягкую, приятную окраску, а нечетные, особенно седьмой, дают резкие, пронзительные звуки [1]. При этом четные обертоны воспринимаются слухом как одинаковые ноты разных октав: «ля» первой октавы имеет частоту 440 Гц, второй – 880 Гц, третьей – 1760 Гц, четвертой – 3520 Гц и т.д. Это же справедливо для последовательного уменьшения частот в два раза. Всего различают (для органа) девять октав – от субконтроктавы (от 16 Гц) до пятой октавы (до 8000 Гц) [2].

Кроме того на субъективные восприятия звука влияет скорость нарастания и затухания звука, а также изменение амплитудных и фазовых соотношений его гармонических составляющих по мере их затухания.

Основой качественного многоголосного звучания считается аккорд. В хроматической гамме [3] различают главные аккорды – минорный и мажорный, содержащие по три основные ноты, и дополнительные аккорды, например, септаккорд, секстаккорд, нонаккорд и др.

Если заранее известно, какой аккорд нужно сформировать, например, «ля» минор, «ля» мажор и т.д., существует устройство, выполняющее это на микропроцессорном, либо даже на микросхемном уровне [3]. Однако задача существенно усложняется, если заранее неизвестно, от какого звука и какой аккорд нужно получить. В главных аккордах – минорном и мажорном – частотное положение первой и третьей нот совпадают, а второй различаются. Например, аккорд «ля»-минор содержит ноты «ля»,

«до», «ми», а «ля»-мажор – ноты «ля», «до» диез, «ми». Причем они могут быть в разных октавах. Обратим внимание, что ноты «ля» и «ми» у них повторяются. Известно, что частота ноты «ля» первой октавы равна 440 Гц. Умножив эту частоту на три, получим 1320 Гц, что соответствует частоте ноты «ми» второй октавы 1319 Гц с точность менее одного цента, что незаметно для человеческого уха. То есть используя сигнал ноты «ля», мы получаем второй сигнал с частотой ноты «ми». Просуммировав их, мы получим две ноты аккорда «ля» как минорного, так и мажорного. К этим двум звукам можно добавить третий («ля» второй октавы частотой 880 Гц), полученный умножением частоты 440 Гц на два, и четвертый («ми» первой октавы) с частотой 660Гц, полученный делением частоты 1320 Гц на два. Это придает звуку органное звучание.

Очевидно, что операции умножения и деления частоты проще проводить с прямоугольными сигналами, а суммировать в аккорд целесообразно сигнал, близкий по форме к гармоническому, что вполне осуществимо в настоящее время при использовании микропроцессоров.

Этот способ позволяет произвольный квазигармонический сигнал преобразовать в квазиаккорд и придать звуку органное звучание.

Однако умножение частоты в простых устройствах может вызвать затруднения. Гораздо проще осуществить деление частоты. Если разделить частоту ноты «ми» второй октавы 1319 Гц на три и на два, мы получим частоты 439,7 и 659,5 Гц, что с точностью 0,1 цент соответствует нотам «ля» и «ми» первой октавы. Просуммировав их, мы снова получим квазиаккорд и органное звучание. При аудио-обмене между оператором и системой это не вызовет проблем, но при использовании устройства, например, в караоке, исполнитель должен петь вторым голосом. Испытания подобного устройства в многотональном музыкальном дверном звонке показало хорошие результаты при минимальных затратах.

Способ позволяет существенно улучшить качество звука голоса, в том числе робота либо ответчика автоматизированной системы при произвольной частоте и форме их исходного выходного аудио-сигнала, причем на любом языке.

1. Кубат К. Звукооператор-любитель. М.: Энергия, 1978.-192с;
2. Байков А.Л. Музыкантам о звукоусилении. Мн.: Полымя, 1981.-88с;
3. Бирюков С.А. Цифровые устройства на интегральных микросхемах. М.: Радио и связь, 1984.-88с.

УДК 621.38

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПРОГРАММЫ PROTEUS 8 ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА»

Тимошевич В.Б.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Программа PROTEUS 8 разработана для проектирования электронных устройств промышленного применения и позволяет оптимизировать на компьютере устройства различной степени сложности из выбранных компонентов. Варьируя типы и параметры диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов, микросхем, можно увидеть, проанализировать изменения свойств и характеристик проектируемых устройств в реальном масштабе времени. Найдя оптимальное схемотехническое решение поставленной задачи, можно спроектировать печатную плату разработанного устройства с учетом конструкционных требований.

Для курса «Электроника и схемотехника» ранее было спроектировано, разработано и изготовлено шесть комплектов лабораторных стендов по разделам: «Пассивные и активные компоненты электронных схем», «Электронные устройства на биполярных и полевых транзисторах», «Электронные устройства на операционных усилителях, таймерах и микросхемах стабилизаторов напряжения», «Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи», «Современные цифровые последовательные и комбинационные устройства и особенности их применения» (~50 работ).

Совместно со студентами старших курсов были разработаны подробные инструкции по работе с программой PROTEUS 8 и эмуляции реальных лабораторных работ в среде PROTEUS 8 с целью определения изменчивости поведения схем и их характеристик при варьировании параметров элементов схем в широком диапазоне. Такие варьирования параметров затратны и трудноосуществимы на реальных макетах за время, отпущенное на лабораторную работу. Таким образом, часто удается добиться оптимизации работы конкретной схемы виртуально, и затем проверить полученный результат на конкретном лабораторном макете. Идеального совпадения удается достигнуть не всегда, т.к. трудно и технически, и психологически ввести в модель все неидеальности параметров конкретной схемы, однако путь к оптимальному решению моделирование подсказывает практически всегда. Студентам понравилось нововведение, т.к. с компьютером они общаются гораздо охотнее, чем с реальными макетами, и это, надо полагать, подстегнуло их интерес к изучению «Электроники и схемотехники». В период удаленного обучения это дало возможность студентам выполнять лабораторные работы вне стен ВУЗа при возможности контроля и оценки со стороны преподавателя.

УДК 621.333:681.51

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ ПОСТОЯНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ

Гульков Г.И.
Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Регулирование скорости СДПМ вверх от номинальной при постоянной мощности нагрузки можно обеспечить ослаблением магнитного потока в воздушном зазоре путем создания размагничивающей продольной составляющей магнитодвижущей силы (МДС) реакции якоря $F_{яd}$. Однако возможность регулирования скорости и регулировочные свойства СДПМ в зоне с $P_{мех}=const$ определяются конструктивным исполнением ротора СДПМ. СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе относятся к неявнополюсным, характеризующимся равенством индуктивных сопротивлений по осям d и q.

Очевидно, что для ослабления потока в зазоре МДС $F_{яd}$ и индуктора с ПМ F_M должны быть соизмеримы. Однако из–за того, что магнитная проницаемость современных постоянных магнитов приближается по значениям к магнитной проницаемости воздуха μ_0, для МДС $F_{яd}$ со стороны якоря постоянный магнит эквивалентен воздушному зазору. Это требует для ослабления F_M значительного тока продольной составляющей якоря $I_{яd}$, который ограничивается номинальным током и номинальными потерями в обмотке якоря СДПМ, номинальными током и напряжением полупроводникового преобразователя.

Практически регулирование скорости вверх от номинальной в СДПМ можно получить путем введения опережающей коммутации фаз СДПМ что равносильно сдвигу щеток с геометрической нейтрали в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением. Однако при таком способе регулирования увеличиваются потери мощности и уменьшается к.п.д. двигателя, а диапазон регулирования скорости не превышает $D=2$.

Вследствие этого режим регулирования скорости вверх от номинальной в неявнополюсных СДПМ является не эффективным и не используется на практике. Такие СДПМ находят применение лишь в тяговом электроприводе легких транспортных средств.

Инкорпорированные СДПМ относятся к явнополюсным, характеризующихся неравенством индуктивных сопротивлений по осям d и q. Электромагнитный момент явнополюсного СДПМ состоит из двух составляющих (рисунок 1):

- основной M_0, образованной в результате взаимодействия магнитного потока ротора с током якоря;
- реактивной M_p, образованной в результате взаимодействия магнитного потока якоря с ферромагнитным материалом ротора.

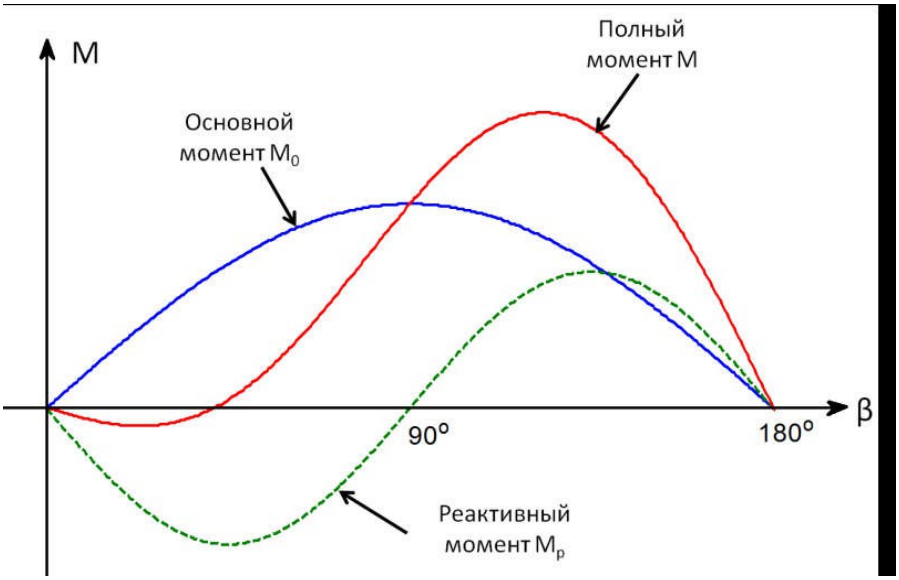


Рисунок 1 – Составляющие электромагнитного момента явнополюсного СДИПМ

Основными ограничениями на диапазон регулирования скорости СДИПМ являются максимальное значение тока I_m и максимальное значение напряжения инвертора. Величина диапазона регулирования скорости СДИПМ в значительной степени определяется параметрами магнитной цепи двигателя, что выражается параметром α, представляющим собой отношение произведения тока I_m на индуктивность L_d к потокосцеплению ψ_M постоянных магнитов. На рисунке 2 приведены графики, показывающие влияние параметров СДИПМ на выходную мощность и диапазон регулирования угловой скорости.

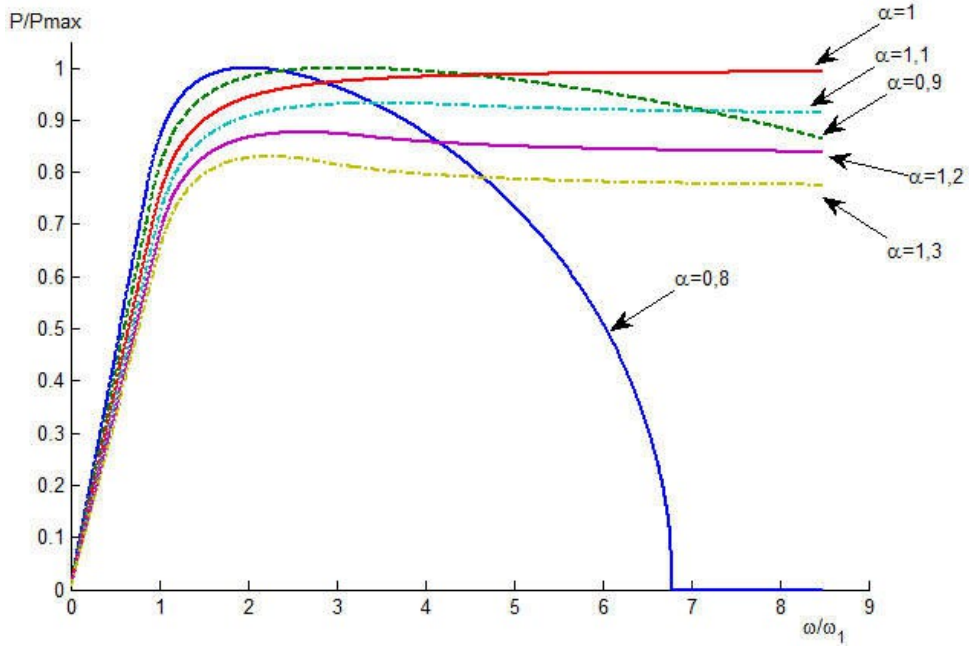


Рисунок 2 – Влияние отношения α на выходную мощность

Совместное действие основного и реактивного момента в СДИПМ позволяет обеспечить требуемые диапазон регулирования скорости при более высоком к.п.д. и меньших массе и габаритах, чем у АД.

УДК 004.4-004.9

ОТКРЫТЫЙ СИМУЛЯТОР ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ - GAZEBO

Дербан А.Н.[1], Бусько А.М. [2]

1). Белорусский национальный технический университет;

2). Иностранное производственное унитарное предприятие «Дана Нетворкс»

Минск, Республика Беларусь

Моделирование элементов робототехнических систем является важным инструментом для современных задач в робототехнике. Эффективный симулятор позволяет быстро тестировать алгоритмы, упрощает проектирование роботов, ускоряет тестирование на основе реалистичных сценариев. Как ключевой компонент для открытой операционной системы для роботов (ROS) эмулятор Gazebo предлагает возможности для точного и эффективного моделирования, как отдельных роботов, так и совокупности роботов среде, приближенной к реальной. Это надежный физический программный движок, распространяемый на основе открытых лицензий, оснащенный качественной графикой и удобным графическим интерфейсом.

Gazebo позволяет использовать один из высокопроизводительных программных движков для моделирования твердых физических тел: ODE, Bullet, Simbody или DART. Базируясь на одном из наиболее популярных открытых графических движков OGRE, Gazebo обеспечивает реалистичное отображение трехмерных сцен с высококачественными источниками освещения, тенями и текстурами. Симулятор позволяет генерировать и обрабатывать сигналы дискретных датчиков, кроме того использовать лазерные дальномеры, данные с 2D/3D камер, датчики типа Kynect, силомоментные сенсоры и т.д. Реализована возможность разработки пользовательских модулей – расширений для роботов, датчиков и окружающей среды на основе программного интерфейса собственной разработки. Существует обширная библиотека готовых моделей роботов, включая PR2, Pioneer2 DX, iRobot Create, и TurtleBot, кроме того есть возможность разработки пользовательских моделей на основе SDF формата (Simulation Description Format).

Gazebo поддерживает возможность эмуляции робототехнических сцен на удаленных серверах, основываясь на базе стека TCP/IP с использованием формата сообщений Google Protobufs, кроме того есть возможность Web доступа, реализованная на базе облачного сервиса Amazon AWS и модуля Gzweb.

Для реализации специфичных настроек и параметров среды эмуляции Gazebo поддерживает развитый набор команд на базе интерфейса командной строки, которые в свою очередь могут группироваться в сценарии, позволяющие автоматизировать типовые задачи симулятора.

УДК 620.92

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПОТОКОВ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Вельченко А.А., Мирончук В.И.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Развитие, наращивание и усовершенствование энергосистем всегда является важным и приоритетным для любого государства. Перспективным направлением на сегодняшний день практически во всех странах является внедрение в энергосистему возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Однако, при проектировании большинства регенеративных энергетических систем, необходимо знать точное значение солнечного излучения в зависимости климатических и географических факторов. Фактически солнечное излучение является главным источником для всех физико-географических процессов происходящих на земле и в атмосфере. Проходя через атмосферу интенсивность солнечного излучения, существенно уменьшается, за счет отражения и поглощения атмосферой, рассеяний Рэлея и Ми, изменения положения Солнца над горизонтом [1]. Так же солнечное излучение меняется в зависимости от климатических условий, от дня в году и в разные годы оно может быть различным.

Оценка солнечного излучения затруднена из-за малого количества актинометрических станций. Это в первую очередь связано с дорогостоящим инструментом, техническим оборудованием, а также с требованиями к техническому обслуживанию и персоналу.

На сегодняшний день имеются различные модели для оценки потоков суммарного солнечного излучения (модель Харгривса-Самани [2], модель Бристоу-Кэмпбелла [3], модель Ангстрема [4, 5], модели на основе солнечного сияния [6], температурные модели [7] и др.) в течении дня, месяца или года. Данные модели основываются на различных методах, таких как геостационарные спутниковые изображения, методы временных рядов, модели переноса физического излучения, методы стохастической погоды и нейросетевых технологий. Эти модели основывались на различных видах данных, включая метеорологические и географические данные. Обработка метеорологических экспериментальных данных может, затруднятся отсутствием полной информации о факторах исследуемой области, а также наличием каких-то неочевидных факторов и в итоге сводится к экспертной оценке. Создание экспертной системы, которая проводила бы выборку информации, сохраняла и использовала дальше полученные знания для обучения искусственной нейронной сети (ИНС).

Применение искусственной нейронной сети (ИНС) для автоматизации обработки данных при расчете потоков солнечной радиации позволит провести обобщение, самообучение и при необходимости переобучение, и

выявить скрытые зависимости между интенсивностью солнечной радиации (выходные данные) и климатическими и географическими факторами (входные данные).

В данной работе на основе трехслоевой ИНС предлагается модель автоматизированной обработки потоков солнечной радиации в зависимости от климатических и географических факторов. Данный подход с использованием трехслоевой ИНС позволяет раскрыть скрытые зависимости между входными данными (географические координаты пунктов наблюдения (широта, долгота, высота над уровнем моря), средняя температура воздуха, относительная влажность, количество облачности, скорость ветра, содержание водяного пара и озона, продолжительность солнечного сияния, порядковый номер дня в году) и выходными данными (интенсивность солнечной радиации) и провести более достоверную оценку интенсивности солнечной радиации для конкретной локальной местности в «on-line» режиме. Это позволит избежать больших экономических затрат на исследование местности с помощью выездных лабораторий.

1. Мирончук В.И, Вельченко А.А. Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021, 64(1):15-26.
2. Hargreaves G. H., Samani Z. A. Estimating potential evapotranspiration // Journal of the Irrigation & Drainage Division, vol. 108, no. 3, 1982, pp. 225–230.
3 Bristow K. L., Campbell G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature // Agricultural and Forest Meteorology, vol. 31, no. 2, 1984, pp. 159–166.
4. Hassan G. E., Youssef M. E., Mohamed Z. E., Ali M. A., Hanafy A. A. New temperature-based models for predicting global solar radiation // Applied Energy, vol. 179, 2016, pp. 437–450.
5. Piri J. Kisi O. Modelling solar radiation reached to the Earth using ANFIS, NN-ARX, and empirical models (Case studies: Zahedan and Bojnurd stations) // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 123, 2015, pp. 39–47.
6. Quej V. H., Almorox J., Ibrakhimov M., Saito L. Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico // Energy Conversion and Management, vol. 110, 2016, pp. 448–456.
7. Almorox J., Quej V. H., Martí P. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Koppen climate classes // Journal of Hydrology, vol. 528, 2015, pp. 514–522.

УДК 621.32

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ СОЗДАНИЯ АСКУЭ

Макаренко Л.С., Глядко В.В., Реентович И.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Нормативно-технической называют документацию, содержащую характеристики, правила, условия и другую важную информацию для осуществления различных видов деятельности.

Ее можно разделить на две группы по происхождению:

внешняя: Технические регламенты (ТР ТС, ТР ЕАЭС, ТР BY), СТБ, ГОСТы, правила, нормы и подобные документы, закрепленные на межгосударственном, государственном и региональном уровне;

внутренняя: Технические условия, рецептуры, стандарты предприятий и другая документация, которую создает и использует организация на локальном уровне.

СТБ 2096-2010 распространяется на реконструируемые, вновь разрабатываемые и внедряемые автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (далее – АСКУЭ) субъектов и объектов учета энергетической системы Республики Беларусь, объектов потребителей электроэнергии независимо от их ведомственной принадлежности и формы собственности и предназначен для использования в системе электроэнергетики, проектных организациях, производителями средств измерений, потребителями электроэнергии, другими заинтересованными сторонами.

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации (далее – ТНПА):

ТКП 183.1-2009 (03130) Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии

ТКП 183.2-2009 (03130) Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии

СТБ 8004-93 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Метрологическая аттестация средств измерений

СТБ ГОСТ Р 52323-2007 (МЭК 62053-22:2003) Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Часть 22. Статические счетчики активной энергии классов точности 0,2S и 0,5S

СТБ ГОСТ Р 52425-2007 (МЭК 62053-23:2003) Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Часть 23. Статические счетчики реактивной энергии и д.р.

УДК 621

УМНЫЕ РОБОТЫ В КОСМОСЕ

Джига Д.А., Гутич И.И.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Сегодня нашу жизнь невозможно представить без автоматизации. Она охватывает практически все сферы общественной жизни. Автоматизация в космосе уже не новость, и сегодня умные роботы начинают всё больше покорять космические глубины. В данной статье разберём новый проект американской компании Made In Space – Archinaut.

Made In Space – американская компания, специализирующаяся на разработке и производстве трехмерных принтеров для использования их в условиях микрогравитации. Сегодня Made In Space с поддержкой NASA активно работают над проектом Archinaut.

Согласно проекту, космический зонд, вращающийся вокруг земли, запускает конечность внутрь себя. Он вытаскивает деталь будущей станции, сделанной прямо у себя внутри с помощью 3D печати. Создавая внутри себя части внеземной станции, он строит её самостоятельно прямо на орбите. С точки зрения Made in Space, зонд может работать самостоятельно, без человека, который будет выполнять все манипуляции, сидя в кресле у себя за столом. Кроме того, способности создавать оборудование из сырьевых материалов на месте облегчит логистику, особенно, когда нужно будет создавать большие объекты, которые не так-то просто уместить в грузовой части ракеты. Archinaut - это настраиваемый набор технологий производства и сборки, который можно интегрировать в свободно летающие спутники. Archinaut использует технологии 3D-печати с настраиваемой расширенной структурой в сочетании с точными автономными роботизированными системами для изготовления сложных пространственно-оптимизированных структур неопределенной длины с использованием термопластов космического назначения. Эту технологию можно настраивать и обновлять в соответствии с потребностями клиента.

1. Smart Robots Are the Secret to Spaceflight's Future [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.popularmechanics.com/space/solar-system/a21561588/smart-robots-space/
2. FOR SPACE, IN SPACE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://madeinspace.us/capabilities-and-technology/archinaut/

УДК 621.316.1:622.33.012.2

АВТОКОМПЕНСАТОР ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ В КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Дубинин С.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Одним из эффективных способов компенсации емкостной составляющей тока утечки на землю в комбинированной электрической сети, содержащей преобразователь частоты, является способ, основанный на применении конвертора отрицательного сопротивления КОСН. На рис.1а представлена схема КОСН, приведенная к виду четырехполюсника [1].

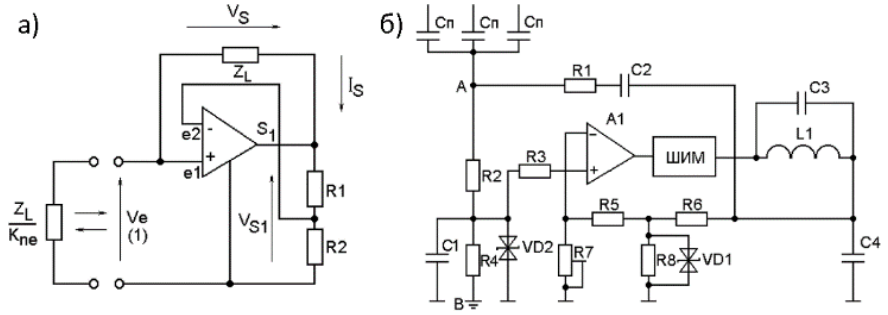


Рисунок 1- Принципиальная схема КОСН

Из схемы рис.1 видно, что

$$V_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_t = A_{Vr} V_t; \quad V_S = V_{S1} - V_e; \quad I_e = -\frac{V_S}{Z_L},$$

следовательно,

$$Y_e = \frac{1}{Z_L}(1 - A_{Vr}) \quad и \quad Z_e = \frac{Z_L}{K_{ne}},$$

где $K_{ne} = 1 - A_{Vr}$, усиление замкнутого усилителя (управляемого источника). Таким образом, на базе КОСН можно легко получить двухполюсник с проводимостью равной 1/X = - C, подключив в качестве Z_L емкость C. На рис. 1б представлена практическая принципиальная схема КОСН на основе дифференциального усилителя класса D, предназначенная для реализации устройства компенсации тока утечки в сетях до 1140В.

Эффективность работы компенсатора проиллюстрирована на экспериментально полученных осциллограммах (Рисунок 2 и Рисунок 3)

Величина тока утечки без компенсатора превышает 100мА (Рисунок 2 осциллограмма 1). При подключении компенсатора емкостной ток утечки на землю снижается до 25 мА (осциллограмма 2), что соответствует величине безопасного параметра тока утечки. Из осциллограммы 1

следует, что основное воздействие на величину утечки на землю оказывает высокочастотное напряжение несущей частоты ПЧ.

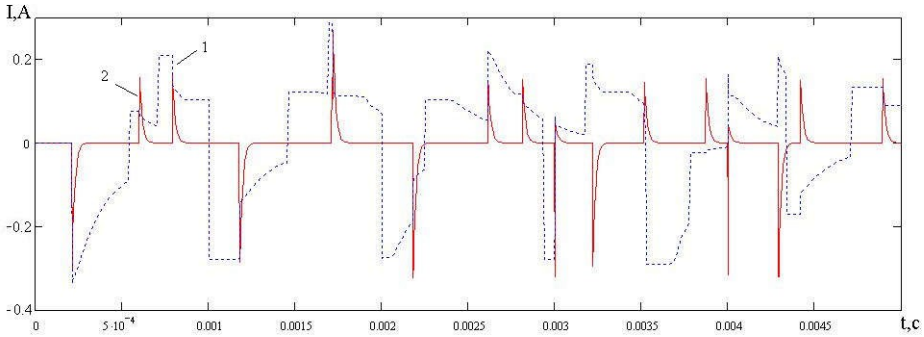


Рисунок 2 – Осциллограммы тока утечки на землю в комбинированной электросети: 1-без компенсации емкостной составляющей; 2-с компенсацией емкостной составляющей тока утечки

При подключении компенсатора емкости сети (осциллограмма 2) форма и величина тока утечки меняется, на осциллограмме присутствуют кратковременные импульсы тока, обусловленные конечным быстродействием операционного усилителя КОС. Действующее значение тока утечки снижается с 100 мА до 25 мА.

При подключения заградительного индуктивного фильтра происходит уменьшение высокочастотной составляющей в составе тока утечки, что сказывается на форме и величине тока утечки на землю (рисунок 3).

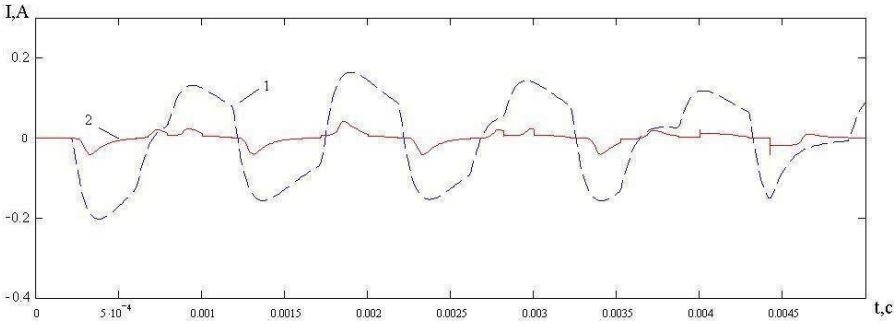


Рисунок 3 – Осциллограммы тока утечки на землю в комбинированной электросети с заградительным фильтром: 1-без компенсации емкостной составляющей; 2-с компенсацией емкостной составляющей тока утечки

Действующее значение тока утечки снижается с 8 мА.

1. Дубинин, С.В. Применение конвертора отрицательного сопротивления для компенсации тока утечки на землю в электрических сетях с преобразователями частоты/ С.В. Дубинин // Научные работы Доннту – Электротехника и энергетика – вып.98.

УДК 621.52

СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Проблема синтеза высококачественных систем автоматического управления (САУ) в энергетике обозначена давно, однако ее актуальность в энергетике Республики Беларусь еще более обострилась в связи с вводом в эксплуатацию первого энергоблока мощностью 1200 МВт Белорусской АЭС в 2020 году и планируемым вводом второго энергоблока в 2021 году. Это обусловлено тем, что энергоблоки Белорусской АЭС будут работать в базовом части графика электрических нагрузок энергосистемы республики, а в пиковой и полупиковой частях графика нагрузок будут работать ТЭС на газовом топливе. Для повышения безопасности, надежности, долговечности и экологичности их работы в переменных режимах необходимо модернизировать основные САУ ТЭС, которые будут обеспечивать существенное улучшение качества поддержания технологических параметров в рабочем диапазоне изменения нагрузок с максимально возможными скоростями их изменения.

Качество регулирования теплоэнергетических процессов, в первую очередь, зависитот точности определения исходных динамических характеристик объектов управления в рабочем диапазоне изменения нагрузок, идентификацию которых теплоэнергетике производят с использованием передаточных, импульсных или частотных характеристик.

Вместе с тем широкое распространение в энергетике получили методы идентификации на основе передаточных характеристик объектов управления. Для повышения точности идентификации теплоэнергетических объектов нами впервые предложена методика описания динамики объектов в виде инерционных звеньев второго порядка с условным запаздыванием. Кроме того, для определения динамических характеристик инерционных участков объектов впервые предложена методика получения их передаточных функций по экспериментальным переходным характеристикам главного и опережающего участков объектов.

Второй проблемой синтеза высококачественных систем автоматического управления является выбор и обоснование критериев качества их работы при основных воздействиях и возмущениях. Традиционно в теплоэнергетике при параметрической оптимизации типовых регуляторов используют интегральные критерии качества при использовании исходных переходных характеристик, а также производят расчет оптимальных параметров динамической настройки типовых регуляторов при ограничении на показатель колебательности переходных

процессов при использовании расширенных комплексных частотных характеристик разомкнутых систем.

В обоих случаях определить прямые показатели качества переходных процессов САУ при основных воздействиях без моделирования или промышленных испытаний нельзя. Для устранения этих недостатков предложено в качестве критериев качества при отработке задающих воздействий использовать математическое описание в виде заданной передаточной функции САУ при отработке задающих воздействий, структура которых зависит от структуры объекта управления и требований заказчика к прямым показателям качества (временя регулирования, величина перерегулирования, скорость изменения регулируемого параметра). Предложная методика отличающаяся тем, что в заданную передаточную функцию критерия оптимальности систем входит только один расчетный параметр настройки $T_{ЗД}$, который позволяет при отработке задания получить требуемые прямые показатели качества в замкнутой САУ без построения переходных процессов или промышленных испытаний. Одновременно $T_{ЗД}$ будет единственным расчетным параметром динамической настройки регулятора рассчитанного на основе передаточных функций оптимального регулятора, из которой как частные случаи получают передаточные функции типовых регуляторов [2, 5, 6]. При этом передаточная функция предложенного оптимального регулятора представляет собой произведение обратной передаточной функции объекта управления, заданной передаточной функции критерия оптимальности и обратной передаточной функции ошибки регулирования при отработке скачка крайнего внешнего возмущения с одним расчетным параметром динамической настройки $T_{ЗД}$, с уменьшением численного значения которой повышается коэффициент передачи регулятора.

Результаты промышленных испытаний САУ температуры перегретого пара котла ТГМП-114 Лукомльской ГРЭС подтвердили, что предложенная инвариантная САУ при внеплановых изменениях нагрузки энергоблока позволяет уменьшить время отработки скачка задающего воздействия в два раза по сравнению с типовой САУ с дифференциатором Лукомльской ГРЭС, а также в два раза уменьшить дисперсию изменения температуры перегретого пара, что существенно повышает экологичность, надежность и долговечность работы котлов энергоблока.

Структурная схема моделирования инвариантной каскадной САР на базе передаточных функций оптимальных регуляторов при плановом изменении нагрузки приведена на рисунке 1.

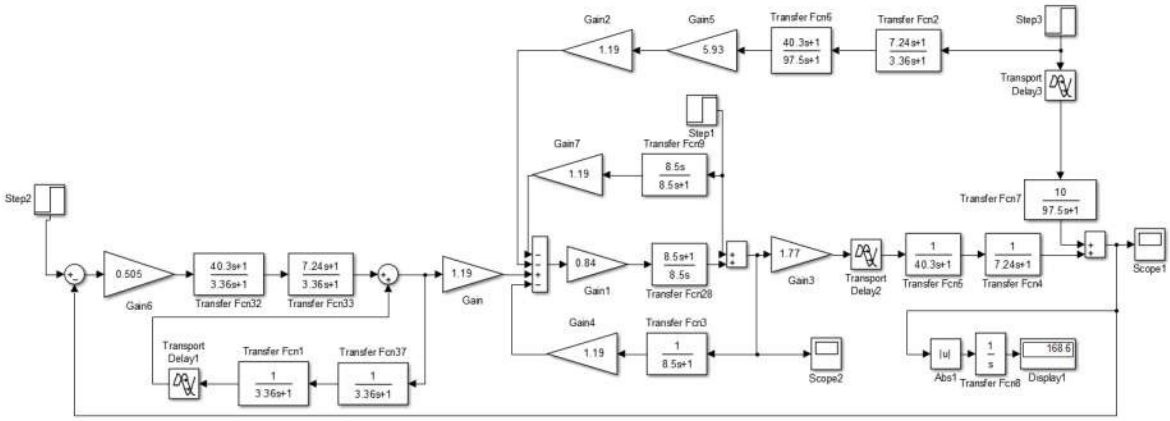


Рисунок 1. Схема моделирования инвариантной каскадной системы автоматического регулирования при плановом изменении нагрузки энергоблока

Переходные процессы в инвариантной каскадной САР при отработке внутреннего возмущения f_1 и внешнего возмущения f_2 приведены на рисунке 2.

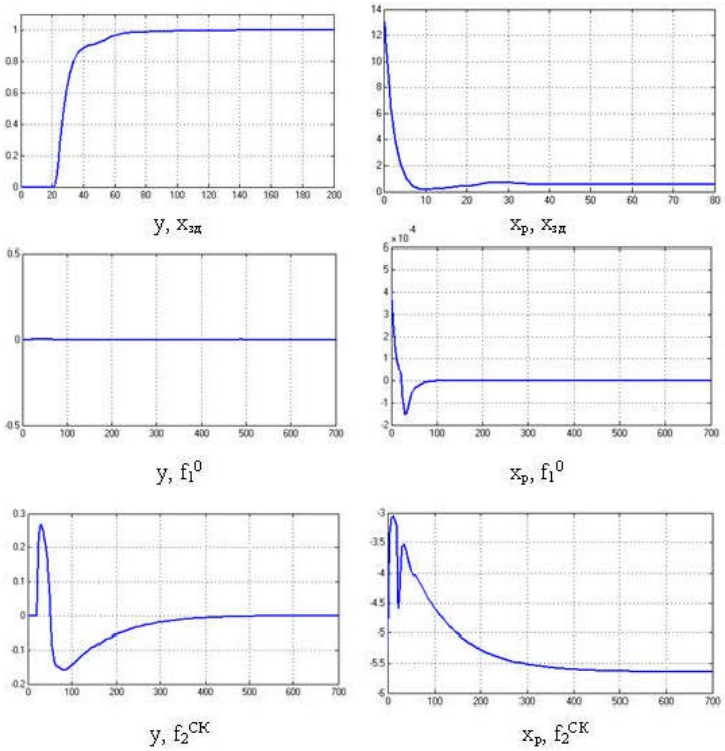


Рисунок 2. Переходные процессы в инвариантной каскадной системе автоматического регулирования при плановом изменении нагрузки энергоблока

Из анализа графиков переходных процессов следует, что отработка скачка задания $y, x_{зд}$ осуществляется в соответствии с критерием оптимальности за время, равное 75 с. При отработке наиболее опасного измеряемого внутреннего возмущения y, f_1^0 достигается полная инвариантность, а при отработке внешнего возмущения достигается инвариантность с точностью до ε, т.к. модуль площади ошибки регулирования $y, f_2^{СК}$ в 11,6 раза меньше чем у САР без устройства компенсации внешнего возмущения.

УДК 621.52

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ТЭЦ

Кулаков Г. Т., Телюк Н. Е.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В рамках городской многоступенчатой системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) закрытого типа подготовка сетевой воды к транспортировке на городской ТЭЦ является одним из наиболее важных этапов всего технологического цикла наряду с производством тепловой энергии, ее транспортировкой по теплосетям и потреблением.

СЦТ обладает рядом неоспоримых конкурентных преимуществ в сравнении с другими способами организации теплоснабжения. Несмотря на это, процесс постепенного усложнения тепловой схемы за счет добавления новых потребителей совместно с моральным и физическим износом существующих АСУ или отсутствием последних может привести к существенному снижению эффективности всей концепции СЦТ.

Актуальность проблем синтеза взаимосвязанных автономных автоматических систем была обоснована еще в работах. Систему подготовки к транспортировке сетевой воды можно условно разбить на несколько последовательных этапов (рисунок 1).

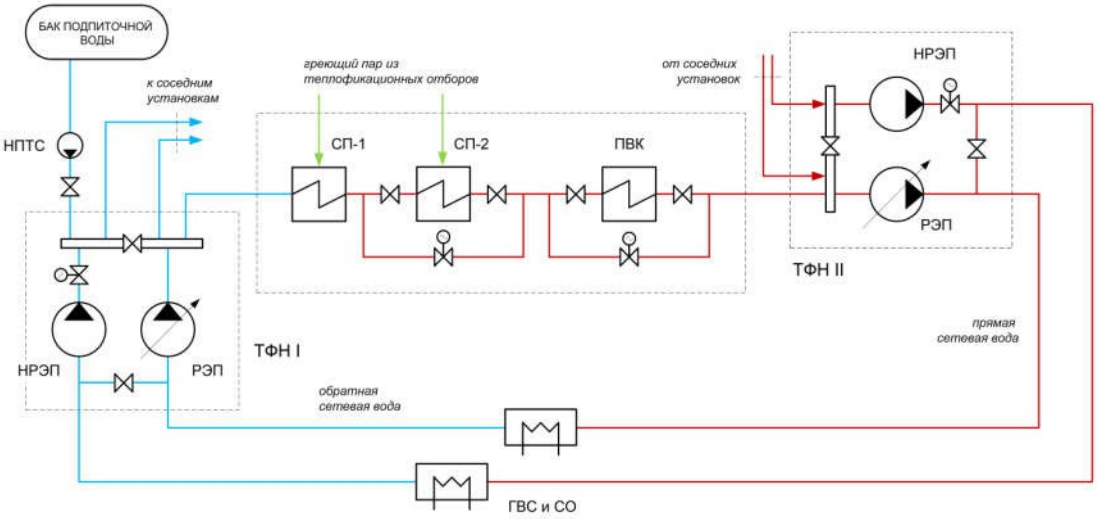


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема подготовки сетевой воды к транспортировке на ТЭЦ

Первый этап заключается в получении сетевой воды. Из тепломагистрали (ТМ) обратной сетевой воды и из резервуаров с предварительно химически подготовленной сырой водой сетевая вода поступает на всас сетевых насосов теплофикационной насосной станции (ТФН). Ввиду того, что в коллектор обратной сетевой воды включены подпиточные насосы, этот узел представляет сложную подсистему вследствие совместной работы двух и более регуляторов. Основная задача

ТФН – обеспечение подачи воды с требуемыми параметрами давления в водоподогревательные установки. На сегодняшний день часть насосных агрегатов оснащена регулируемыми электроприводами (РЭП), которые оказывают стабилизирующий эффект на давление, нивелируя возникающие колебания в стационарных режимах работы теплосети.

Второй этап заключается в непосредственном получении тепловой энергии от сетевых подогревателей, питаемых от отборов теплофикационных турбин и водогрейных котлов. В общем случае реализуется двухступенчатый нагрев воды. Существующая автоматика осуществляет поддержание температуры сетевой воды на выходе из подогревателя на заданном уровне посредством изменения подводимого количества греющего пара и доли подмешиваемой холодной сетевой воды в выходном трубопроводе.

При двухступенчатой схеме подъема третий этап заключается в поступлении подогретой сетевой воды на всас сетевых насосов ТФН второго подъема. Здесь основная задача ТФН заключается в поддержании в стационарных режимах в напорной тепломагистали давления в зависимости от гидравлического сопротивления теплосети. Процесс регулирования давления осуществляется, как правило, в автоматическом режиме средствами существующих АСУ, которые посредством формирования управляющих воздействий корректируют частоту вращения РЭП. Поддержание температуры сетевой воды зачастую производится в ручном режиме.

После установления связей между отдельными элементами по потокам вещества и энергии, данная структура может быть положена в основу универсального математического описания. На основании анализа суточных графиков изменения температуры и давления прямой сетевой воды с совмещенными графиками температуры наружного воздуха для осеннего, зимнего и весеннего отопительного периода, полученных на ТЭЦ, работающих по отопительному графику центрального качественного регулирования 130 / 70 с верхней срезкой 105 ^{0}С и нижней 70 ^{0}С, были сделаны следующие выводы: требование СТП в части точности поддержания регулируемого параметра (температуры) на уровне не более ±3 % от задания в ряде случаев не выполняется; также в ряде случаев не выполняется диспетчерский график по отпуску тепловой энергии потребителям; изменение состава и режима работы оборудования приводит к резким скачкам температуры сетевой воды (свыше 15 ^{0}С / 30 мин), что негативно сказывается на общей надежности теплосети; дополнительным производным фактором ручного регулирования температуры является неоптимальная загрузка сетевых насосных агрегатов ТФН, которая приводит к существенному снижению экономического эффекта работы РЭП; не гарантирована стабилизация режима после ночной разгрузки.

УДК 621.52

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ

Кулаков Г.Т., Воюш Н.В., Сазоненко Е.Р.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Системы автоматического регулирования с дифференцированием промежуточной регулируемой величины получили широкое распространение в области автоматизации теплоэнергетических процессов. Качество регулирования таких систем зависит от использующих методов оптимизации параметров динамической настройки регуляторов и дифференциаторов. В связи с этим актуальной является задача выбора лучшего метода расчета параметров динамической настройки таких систем.

Изучены результаты сравнительных исследований по определению оптимальных параметров динамической настройки САР с дифференциатором различными методами и оценке их влияния на качество отработки основных воздействий.

При этом методы БНТУ для оптимизации типовых САР с дифференциатором сравнивались с наиболее распространенными в теплоэнергетике методами (МЭИ, ВТИ, Сибтехэнерго и КПИ).

Метод МЭИ представлен двумя модификациями: для точного расчета параметров динамической настройки с использованием КЧХ участков регулирования и с применением переходных характеристик объекта. Причем оба метода МЭИ в качестве критерия оптимальности используют минимум линейного критерия при ограничении показателя колебательности переходных процессов величиной $M \leq 1{,}55$, обеспечивающий минимум дисперсии ошибки регулирования при низкочастотных возмущениях.

Метод ВТИ основан на получении переходных процессов со степенью затухания $\Psi=0{,}9$ и минимальной площадью под кривой переходного процесса при детерминированных скачкообразных возмущениях. При этом в качестве исходных используют переходные характеристики опережающего и инерционного участков регулирования.

По методу Сибтехэнерго, изложенному в , исходными данными для расчета параметров динамической настройки регулятора и дифференциатора являются переходные характеристики опережающего и главного участка регулирования объекта.

В основу расчета параметров динамической настройки САР со стабилизирующим устройством для объектов с большим запаздыванием по методу КПИ использовали упредитель Смита.

Во всех сравнениях методов оптимизации САР с дифференциатором отношение $k_р/T_и$ в методах БНТУ больше, чем в других методах, т.е. меньше максимальная динамическая ошибка регулирования. При отработке внешних возмущений в методах БНТУ произведение $k_д T_д$ всегда меньше, т.е. площадь модуля ошибки регулирования меньше.

Анализ данных, позволяет сделать следующие выводы:

1. использование методов оптимизации БНТУ (МПК и МЧК) по сравнению с методами МЭИ, использующими для расчета настройки САР с дифференциатором КЧХ объекта, приводит к уменьшению максимальной динамической ошибки регулирования при отработке внутреннего возмущения на 19%, а модуля площади ошибки регулирования при отработке внешнего возмущения – на 2,2%;
2. использование переходных характеристик объекта в качестве исходных для расчета параметров динамической настройки САР методом БНТУ позволяет уменьшить максимальную динамическую ошибку регулирования при отработке внутренних возмущений на 5,4% по сравнению с МЭИ. При этом модуль площади ошибки регулирования при отработке внешних возмущений уменьшается на 5%;
3. применение МПК для оптимизации параметров динамической настройки САР топлива прямоточного котла позволяет уменьшить максимальную динамическую ошибку регулирования при отработке внутреннего возмущения на 28% по сравнению с методом ВТИ. При этом качество отработки внешнего возмущения практически одинаково;
4. использование методов БНТУ для оптимизации САР впрысков позволило уменьшить максимальную динамическую ошибку регулирования при отработке внутреннего возмущения на 66% по сравнению с методом Сибтехэнерго. При этом модуль площади ошибки регулирования при отработке внешнего возмущения уменьшилась на 6,4%.

По сравнению с методами КПИ методы БНТУ приводят при оптимизации САР впрысков к уменьшению максимальной динамической ошибки регулирования при отработке внутреннего возмущения на 6% и уменьшают модуль площади ошибки регулирования при отработке внешнего возмущения на 22%.

Анализ полученных результатов оптимизации типовых двухконтурных САР с инерционными датчиками позволяет сделать вывод о том, что традиционные методы параметрической оптимизации не позволяют существенно улучшить качество отработки основных воздействий. Вместе с этим методы БНТУ (МПК и МЧК) обеспечивают лучшее качество регулирования по сравнению с зарубежными методами при всех основных воздействиях.

УДК 621.181.6

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ И ТИПОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ЗА КОТЛОМ

Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Воюш Н.В., Колесников В.М.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Для повышения качества поддержания температуры перегретого пара за котлом ТГМП-114 Лукомльской ГРЭС Белорусским национальным техническим университетом на основе разработанной теории структурно-параметрической оптимизации систем автоматического регулирования [1÷3] были предложены следующие методы параметрической оптимизации и новые структурные схемы инвариантных систем автоматического регулирования (САР) регуляторов впрысков для повышения качества регулирования в широком диапазоне изменения нагрузки:

1. методы параметрической оптимизации типовых САР с дифференциатором;
2. типовая САР с дифференциатором, дополненная устройством компенсации наиболее опасного внутреннего возмущения по температуре перегретого пара до места второго впрыска;
3. инвариантная каскадная САР по отношению к неизмеряемому внешнему возмущению и дополнительным дифференциатором инвариантности наиболее опасного измеряемого внутреннего возмущения.

Предложенные САР сравнивались с типовой САР ЛГРЭС, реализованной на базе САР с дифференциатором со штатными настройками.

При этом дифференциатор типовой САР БНТУ был оптимизирован по методу полной компенсации в частном виде (МПК в ЧВ) по динамике иннерционного участка пароперегревателя, а параметры динамической настройки регулятора рассчитывались по методу частичной компенсации по динамике опережающего участка с учетом коэффициента передачи дифференциатора [2].

В типовых САР ЛГРЭС и БНТУ с дополнительным дифференциатором инвариантности наиболее опасного внутреннего возмущения, параметры динамической настройки которого впервые предложено определять из условия равенства передаточной функции дифференциатора инвариантности обратной передаточной функции регулятора.

Инвариантная каскадная САР БНТУ была реализована на базе структурной схемы типовой каскадной САР с двумя ПИ-регуляторами, у которой корректирующий регулятор был настроен на оптимальную отработку внешнего возмущения по МПК в ЧВ, а стабилизирующий – на

основе передаточной функции оптимального регулятора с использованием передаточной функции опережающего участка.

Затем параллельно инерционному участку пароперегревателя была реализована его модель, выход которой с обратным знаком был подключен ко входу дополнительного элемента сравнения, на второй вход которого был подключен сигнал по температуре пара за котлом, а разница между ними с выхода дополнительного элемента сравнения поступала на вход устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, реализованного в виде инерционно-дифференцирующего звена второго порядка, инвертируемый выход которого был подключен ко входу стабилизирующего регулятора. В результате была реализована инвариантная каскадная САР по отношению к внешнему возмущению, которой был добавлен дифференциатор инвариантности по отношению наиболее опасному внутреннему возмущению. На основе анализа переходных процессов 27 промышленных экспериментов были получены следующие выводы:

При наборе нагрузки энергоблока с 270 до 300 МВт со скоростью 5 МВт/мин максимальное отклонение температуры пара на выходе из котла ТСАР ЛГРЭС составила A_1=±3,05 °С, а при снижении нагрузки с 300 до 270 МВт – A_1=±2,2 °С при среднем значении $A_{1\ ср}$=±2,63 °С.

Использование инвариантной каскадной САР с дифференциатором инвариантности дополнительно измеряемого внутреннего возмущения по температуре пара до места впрыска позволило уменьшить максимальное отклонение температуры пара на выходе котла в 1,42 раза.

На средней нагрузке котла использование типовой САР ЛГРЭС с дифференциатором инвариантности по внутреннему возмущению позволяет уменьшить максимальное отклонение температуры пара на выходе котла в 1,73 раза по сравнению со штатными настройками типовой САР.

Замена типовой САР ЛГРЭС на каскадную САР позволяет улучшить качество регулирования в 1,5 раза.

Таким образом, разработанные варианты модернизации регуляторов второго впрыска целесообразно рекомендовать для внедрения на всех САР температуры перегретого пара за котлом ТГМП-114 дубль-блоков мощностью 300 МВт Лукомльской ГРЭС.

1. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: Спр. пособие / Г.Т. Кулаков. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 192 с.

2. Кулаков, Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / Г.Т. Кулаков. Минск: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.

3. Кузьмицкий, И.Ф. Теория автоматического управления: учебник / И.Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.

УДК 621.91.02

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ 3D МОДЕЛЕЙ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Попок Н.Н., Портянко С.А., Анисимов В.С., Косяк Л.Н., Гвоздь Г.И., Тихон Е.М.
Полоцкий государственный университет
Полоцк, Республика Беларусь

При изготовлении деталей с использованием 3D-технологий возникают вопросы, связанные с соответствием получаемых размеров и шероховатости поверхностей заданным на чертеже. Естественно, предположить, что точность и шероховатость поверхностей деталей будет зависеть от особенностей трехмерной технологии и свойств используемых материалов.

На рисунке 1 представлены эскиз и макеты экспериментальных образцов блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ), изготовленных с использованием трехмерной печати. Технические характеристики 3D принтеров и используемых материалов: Stratasys Mojo – толщина слоя 178 мкм, материал печати – ABSplus-P430 (минимальная толщина стенок – 1 мм, коэффициент удлинения – 6%, толщина слоя – 0,178 мкм); Mass Portal Pharaoh XD 30 – толщина слоя от 20 мкм, материал печати – PLA (минимальная толщина стенок – 1 мм, коэффициент удлинения – 30%, толщина слоя – 0,313 мкм).

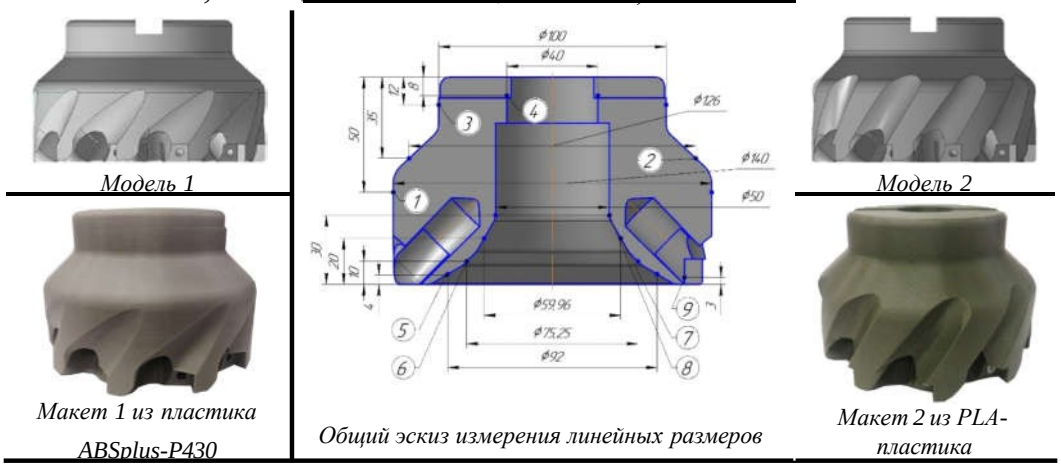


Рисунок 1 – Эскиз и макеты БМРИ

На общем эскизе (см. рисунок 1) указанные позиции 1-9 отображают последовательность измерения линейных размеров с периодичностью в 10 точек с вычислением среднего значения размера в каждой из них.

На видеоизмерительном микроскопе модели NVM-4030D фирмы NORGAU (рисунок 2) измеряли не только линейные размеры конструктивных элементов, но и изучали структуру полученных поверхностей (рисунок 3). Технические характеристики микроскопа

следующие: погрешность E (x, y), мкм ≤ (3+L/200), тип датчика: цветная камера ПЗС 1/2", увеличение: оптическая система – 0,7 - 4,5 x; WD 92 мм.

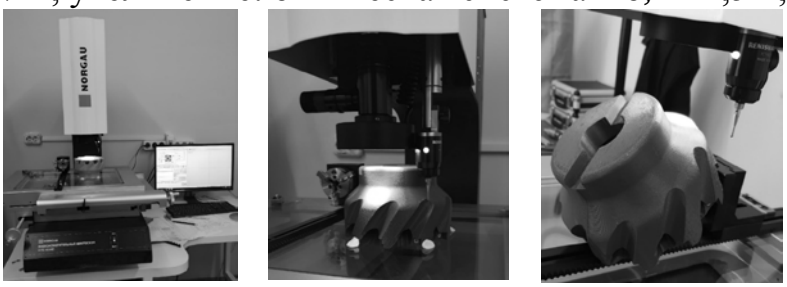


Рисунок 2 – Измерение линейных размеров и изучение структуры наружной поверхности

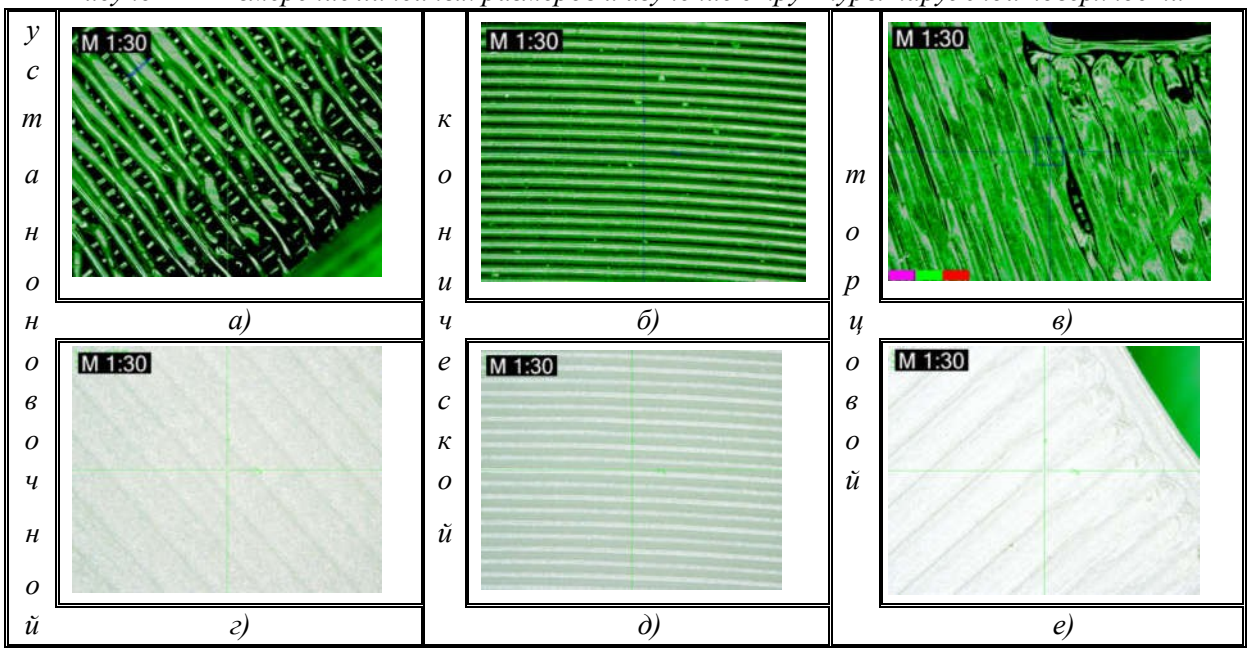


Рисунок 3 – Структура наружной поверхности БМРИ, напечатанных: а, б, в – из пластика ABSplus-P430; г, д, е – из PLA-пластика

В результате измерений установлено, что величина отклонений диаметральных размеров и круглости поверхности в пределах: для 3D печати на принтере Stratasys Mojo – ~ 0,32 мм и ~ 0,09 мм соответственно, для 3D печати на принтере Mass Portal Pharaoh XD 30 – ~ 0,38 мм и ~ 0,06 мм соответственно.

Шероховатость поверхностей детали оценивалась на профилографе-профилометре модели «Абрис-ПМ7», предел допускаемой основной погрешности которого соответствует значению, определяемому по формуле: $\Delta Ra = 0.02\ Ra_{в.п.} + 0.04\ Ra$ (мкм).

Структура и шероховатость поверхностных слоев деталей различны и зависят от способов наложения слоев материала и их пересечения.

Анализ результатов оценки параметров точности и шероховатости поверхностей деталей показывает, что для свободных размеров или нерабочих поверхностей и конструктивных элементов степень точности, обеспечиваемая 3D принтерами достаточна, а для сопрягаемых поверхностей пазов торцовой шпонки, отверстий для установки блоков резцовых и других требуется дополнительный подбор материала, учитывающий толщину и свойства нити, отработки технологии 3D печати.

УДК 658.512:004

ПОВЫШЕНИЕ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И ЧЕЛОВЕКА

Новичихин Р.В., Дербан А.Н., Журавлёва Е.Р., Реентович И.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

На кафедре «Робототехнические системы» БНТУ реализовывается проект по повышению уровня коллаборативности промышленных роботов (ПР). Проект в целом затрагивает следующие аспекты совместимости робота и человека:

- технологический (функционал, организация среды);
- механический (компоновка, кинематика, эргономика);
- сенсорный (очувствление);
- управленческий (адаптивность);
- программное обеспечение (обучение);
- коммуникационный (общение, отражение, физиология);
- психологический (эмоции, работоспособность, стимулирование);
- интеллектуальный (анализ, оценка, принятие решений, поддержка реализации).

Раздел проекта, посвященный эмоциональному интерфейсу ПР, был представлен ранее [1]. Данный доклад посвящен разделу технологической и механической совместимости ПР и человека.

Предметная область (ключевые слова): промышленная робототехника, коботы, технология роботизированного производства, манипуляционные возможности роботов, эргономика, психология труда.

Объект: промышленная система «человек-робот» (СЧР), в частности тандем человек-кобот.

Область исследования: технология и механика (кинематика) СЧР.

Суть проблемы: возможности современных ПР, включая коллаборативные, продолжают оставаться несопоставимыми по сравнению с человеком. Возможности отличаются набором, способом их реализации и численными характеристиками. Эти отличия препятствуют безболезненной интеграции ПР в традиционно ориентированную на человека производственную среду, их взаимозаменяемости с человеком или совместной работе «бок о бок» с ним.

Цель: повышение эффективности функционирования СЧР, за счет совершенствования технологической (работа, переналадка, внедрение) и механической (кинематика, эргономика) совместимости человека и робота, в частности, за счет увеличение сходства их манипуляционных возможностей.

Виды достигаемой эффективности:

функциональная (гибкость и производительность производства);

социальная (безопасность, облегчение и привлекательность труда);

экономическая (рентабельность, как следствия первого вида эффективности, и экономия ресурсов на внедрение ПР).

Ожидаемый конечный результат: комплект модульной и настраиваемой оснастки к покупному роботу. Использование комплекта приближает ПР к реализации принципа «работа из коробки» (при внедрении – интеграция в систему, встраивание в рабочее место, адаптация к процессу). Делает обучение ПР на новую операцию более интуитивным и быстрым (при переналадке). Делает движения ПР более предсказуемыми и безопасными, подстроенными под кинематику и рабочую зону заменяемого или взаимодействующего человека (при работе).

Ожидаемый сопутствующий эффект: дооснащение существующих традиционных ПР предлагаемым комплектом совместно с комплексом [1] переводит их без существенной доработки и затрат в разряд коллаборативных.

Некоторые из предлагаемых решений для ПР (добавление и реконфигурация оснастки, без переделки собственно покупного ПР):

перевод рабочей плоскости ПР из вертикальной плоскости (локоть вверху) в более свойственную человеку горизонтальную плоскость (локоть на/параллельно столу);

добавление в плечевой сустав ПР регулируемой или пассивно управляемой без собственного привода третьей степени подвижности с пересечением осей в одной точке (шаровой шарнир, как у человека);

модульный и настраиваемый принцип компоновки оснастки (вариантность монтажа ПР, возможность использовать двух ПР, по аналогии с двумя руками человека);

оснащение манипулятора дополнительной съемной шаровой опорой (частично замкнутая кинематическая схема, по аналогии с опорой человека на локти);

вынос монтажной стойки для ПР с центра рабочей зоны на периферию, чтобы не загромождала (человек обычно работает в передней полусфере, не за спиной);

использование для реконфигурации оснастки программных перемещений самого ПР.

В докладе приведены теоретические предпосылки, анализ аналогов, предлагаемые технические решения, варианты их реализации.

1. Новичихин, Р.В. Эмоциональный интерфейс для промышленных роботов / Р.В. Новичихин, А.Н., А.Н. Дербан, Е.Р. Журавлёва,

И.А. Реентович И.А.// Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф./редкол.: Маляревич А.М. (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2020, – С. 126-127.