

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 681.2.08

**ПАНТЕЛЕЕВ**  
**Константин Владимирович**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ  
ПОТЕНЦИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОМПЕНСАЦИОННОЙ  
ЗАВИСИМОСТИ ЗОНДА КЕЛЬВИНА**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения

Минск, 2016

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель:

**Жарин Анатолий Лаврентьевич,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии»  
Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:

**Лыньков Леонид Михайлович,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Защита информации»  
учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»;

**Михнев Валерий Александрович,**

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории радиотомографии Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация:

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Защита диссертации состоится 27 января 2017 г. в 14.15 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря: +375 (17) 293 96 18, e-mail: d.02.05.17@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «23» декабря 2016 г.

Ученый секретарь Совета  
по защите диссертаций,  
кандидат технических наук,  
доцент



Н. Н. Ризноокая

© Пантелеев К. В., 2016

© Белорусский национальный  
технический университет, 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Поверхностный электростатический потенциал является универсальным параметром, содержащим информацию о химических, структурных, механических, электронных и прочих свойствах поверхности или границы раздела материалов с диэлектрическими и проводящими покрытиями. В случае металлов, сплавов и полупроводников основной вклад в формирование потенциального рельефа вносит работа выхода электрона (РВЭ). В случае диэлектриков, поверхностный электростатический потенциал обусловлен собственными и/или приобретенными в результате внешних воздействий зарядами. Визуализация потенциального рельефа позволяет находить «артефакты» на поверхности материалов, не разрешаемые прочими методами анализа поверхности.

Наиболее перспективными для контроля состояния поверхностей по электростатическому потенциалу являются методы контактной разности потенциалов (КРП). В общем случае методы КРП являются бесконтактными. Они не требуют дополнительных воздействий на измеряемую поверхность и не вносят искажений в их поверхностное состояние. Отличительной особенностью методов КРП является измерение относительно большого участка поверхности (до нескольких квадратных миллиметров). При этом в случае металлов и сплавов толщина слоя, участвующего в формировании информации, составляет несколько десятых долей нанометра. Последнее сопоставимо с атомно-силовой и туннельной микроскопией.

Традиционные методы КРП имеют относительно простое практическое воплощение, что позволяет их использование в процессе различных воздействий на поверхность (механических, электромагнитных, световых, зарядовых и т.п.). Например, они применяются в совокупности с зондирующими воздействиями светом и коронным разрядом для исследования полупроводниковых пластин, обеспечивая получение важной информации для контроля и совершенствования современных полупроводниковых технологий. Кроме того, они применяются для контроля технологических процессов при обработке материалов и контроля состояния поверхностей при трении твердых тел.

В странах СНГ систематических исследований в области приборов и методов измерения КРП практически не проводится. Они были реализованы только на простейших лабораторных установках, то есть их тиражирование и широкое внедрение сдерживается отсутствием функционально законченных измерителей.

В рамках диссертационной работы проведен анализ существующих методов и средств измерения КРП, разработаны унифицированные подходы к конструированию функционально законченных измерителей КРП, как на основе метода Кельвина–Зисмана, так и на основе разработанного не компенсационного метода измерения КРП.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами и темами.** Тема диссертации утверждена Советом Белорусского национального технического университета (приказ БНТУ от 09 декабря 2013 г. № 4970-лс) и соответствует следующим направлениям из перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь

на 2011–2015 г., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь №585 от 19.04.2010 г.: п. 5.12 – «Аппаратно-программное обеспечение измерительно-управляющих систем, приборов и датчиков, цифровая обработка сигналов, средства автоматизации промышленных предприятий, транспорта и испытательных центров», п. 7.5 – «Методы и средства неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга и испытаний в процессах производства и эксплуатации машин», п. 8.10 – «Неразрушающий контроль материалов и конструкций».

Результаты, полученные в диссертационной работе, связаны с выполнением научно-исследовательских работ, проведенных в рамках ГПНИ: «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», задание 1.21 (2014–2015 г., гос. рег. № 20140687), «Механика, техническая диагностика, металлургия», задание 4.39 (2014–2015 г., гос. рег. № 20141181), «Электроника и фотоника», задание 1.1.20 (2014–2015 г., гос. рег. № 20141184), хозяйственного договора в рамках мероприятия 2.3 программы Союзного государства «Мониторинг-СГ», № 89-БНТУ от 03.03.2014 г. (2014–2015 г., гос. рег. № 20140756).

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка унифицированных малогабаритных функционально законченных измерительных устройств и методов измерения контактной разности потенциалов, обладающих улучшенными точностными характеристиками, чувствительностью и быстродействием.

Для достижения поставленной цели определены **следующие задачи:**

- исследовать закономерности формирования компенсационной зависимости сигнала измерительного динамического конденсатора;
- провести анализ составляющих погрешности при измерении КРП по методу Кельвина–Зисмана с фазовой автокомпенсацией измеряемой величины;
- разработать метод и алгоритмы измерения КРП путем анализа компенсационной зависимости сигнала измерительного динамического конденсатора в режиме реального времени с помощью цифровых средств измерения;
- провести анализ влияния изменения расстояния между пластинами измерительного динамического конденсатора на погрешность измерения КРП;
- исследовать возможность определения параметров изменения расстояния между пластинами измерительного динамического конденсатора путем анализа компенсационной зависимости в режиме реального времени с помощью цифровых средств измерения;
- разработать функциональные структуры, схемотехнический и конструкционный дизайн малогабаритных полностью сформированных аналоговых и цифровых измерителей КРП;
- провести экспериментальные исследования разработанных методов и средств измерения КРП непосредственно при испытании, неразрушающем контроле и диагностике состояния поверхностей материалов.

Объектом исследований являются методы и средства измерения КРП. Предметом исследований являются методологические основы измерения КРП на основе анализа компенсационной зависимости выходного сигнала измерительного динамического конденсатора; структурная, схемотехническая и конструкционная реализация малогабаритных функционально законченных цифровых и аналоговых измерителей КРП для систем сканирования и картирования потенциала поверхностей, непрерывного контроля технологических процессов обработки поверхностей и др.

**Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан новый метод измерения КРП, заключающийся в анализе компенсационной зависимости измерительного динамического конденсатора путем определения амплитуд сигнала при двух и более последовательно заданных потенциалах компенсации, и последующем вычислении КРП методом линейной аппроксимации (патент ЕА). Метод исключает область неопределенности, имеющуюся в методе Кельвина–Зисман, и реализован в цифровых измерителях КРП и электростатического потенциала диэлектриков.

- предложен цифровой измеритель КРП, не требующий фазового детектирования и интегрирования сигнала измерительного динамического конденсатора, при этом исключаются ошибки следящей системы и аналого-цифрового преобразования, имеющиеся в аналоговом измерителе контактной разности потенциалов, а также в десятки раз сокращается время одного измерения. Использование цифровых измерителя позволило значительно сократить время картирования потенциала поверхности.

- предложен цифровой измеритель электростатического потенциала диэлектриков относительно эталонного (зондового) образца, не требующий приложения к эталонному образцу измерительного динамического конденсатора потенциала компенсации эквивалентного электростатическому потенциалу диэлектрика.

- разработан способ определения расстояния между измеряемым и эталонным образцом измерительного динамического конденсатора по угловому коэффициенту компенсационной зависимости, определяемому в одном цикле с измерением КРП. Использован для автоподстройки зазора и автоматического подвода зонда к измеряемой поверхности.

- разработаны принципы структурной, схемотехнической и конструктивной реализации функционально законченных аналоговых и цифровых измерителей КРП широкого назначения. Обеспечивают построение различных специализированных устройств и установок для контроля долговременных изменений потенциала поверхности, а также зондового картирования потенциала поверхности. Разработанные измерители использованы в установках сканирования полупроводниковых пластин на ОАО «ИНТЕГРАЛ» (Минск), а также при выполнении заданий ряда ГПНИ.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Впервые предложенный не компенсационный метод измерения контактной разности потенциалов путем аппроксимации компенсационной зависимости сигнала измерительного динамического конденсатора, полученной по двум и более значениям амплитуды сигнала при различных потенциалах компенсации, позволяет минимизировать влияние паразитных шумов и наводок, что исключает область неопределенности, имеющуюся в методе Кельвина–Зисмана.

2. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов, по сравнению с аналоговым, не требует применения фазового детектирования и интегрирования сигнала, что исключает ошибки следящей системы и аналого-цифрового преобразования, и сокращает время измерения в 20–50 раз (в зависимости от частоты модуляции динамического конденсатора) и, соответственно, сокращает время получения изображения при его использовании в зондовых сканирующих системах.

3. Цифровой измеритель электростатического потенциала диэлектриков (до сотен вольт) не требует приложения к эталонной поверхности измерительного динамического конденсатора напряжения компенсации эквивалентного потенциалу диэлектрика (достаточно напряжение компенсации, не превышающее 10 вольт).

4. Способ определения расстояния между пластинами измерительного динамического конденсатора по угловому коэффициенту компенсационной зависимости измерительного сигнала, определяемому одновременно со значением контактной разности потенциалов, позволяет осуществлять автоподстройку зазора и автоматический подвод зонда к измеряемой поверхности, а также, в случае необходимости, регистрировать отклонения геометрических размеров образца параллельно с измерением контактной разности потенциалов.

5. Принципы структурной, схемотехнической и конструктивной реализации функционально законченных аналоговых и цифровых измерителей потенциала поверхности обеспечивают построение специализированных установок, как для контроля долговременных изменений потенциала поверхности (аналоговые – ошибка, не более 1 мВ, площадь зонда – от 1 мм<sup>2</sup> и более), так и для систем зондового картирования потенциала поверхности (цифровые – ошибка, не более 0,1 мВ, пространственное разрешение – от 0,05 мм до 1 мм).

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Автор принимал участие в совместной с научным руководителем постановке задач диссертационных исследований, планировании и проведении экспериментов [2–5, 17–24], анализе полученных результатов [4, 5, 26–33, 35] и формулировке выводов [1, 6–8, 30], подготовке публикаций. Совместно с соавторами публикаций по теме диссертации автор участвовал в разработке, конкретизации, алгоритмической и аппаратной реализации методов и технических средств измерений [6–16, 36], подготовке образцов для исследования и проведения отдельных измерений параметров поверхности функциональных и конструктивных материалов для изделий микроэлектроники, лазерной оптики, машиностроения и др. [3, 27, 34]. Со всеми соавторами совместно проводился анализ и обсуждение полученных результатов. Результаты, полученные другими соавторами, не вошли в диссертационную работу.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационных исследований были доложены и обсуждены на следующих международных научно-технических конференциях: «Трибология и Надёжность» (Санкт-Петербург, 2014), «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, 2014), «Приборостроение» (Минск, 2014, 2015, 2016), «Полимерные композиты и трибология» (Гомель, 2015), «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2015), «Актуальные проблемы прочности» (Харьков, 2014, Севастополь, 2016), «Инновационные технологии в машиностроении», (Новополоцк, 2015), «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2016), «Приладобудованне: стан і перспективи» (Киев, 2016); научно-технических конференциях молодых ученых: «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (Гомель, 2014), «Новые направления развития приборостроения» (Минск, 2015, 2016); международном научно-техническом симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2015).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 37 печатных работах (всего 9 а. л.), включая: 9 статей в научных изданиях, из них 6 статей в журналах и 1 статья в сборнике научных трудов согласно перечню научных изданий, рекомендуемых ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований (4,4 а. л.), 2 статьи в зарубежных рецензируемых научных изданиях (0,8 а. л.), 1 глава в коллективной монографии (0,9 а. л.), 20 статей и 6 тезисов в сборниках материалов международных научно-технических конференций и симпозиумов (всего 2,65 а. л.), 1 заявка на изобретение с положительным решением на выдачу патента Евразии (0,25 а. л.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации – 120 страниц, включая 41 рис. и 5 табл. на 35 страницах, список использованных источников из 95 наименований на 8 страницах, список собственных публикаций соискателя из 37 наименований на 6 страницах, 5 приложений на 15 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** кратко представлена информация об основных преимуществах методов КРП и отмечено их место среди прочих методов анализа поверхности. Приведены примеры их использования в различных областях и определены основные направления исследований. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы.

**В первой главе** рассматривается краткая история и современное состояние в области развития методов и средств измерения КРП с динамическим конденсатором (метод Кельвина–Зисмана). Отмечается, что, несмотря на широкое использование методов КРП в практике фундаментальных и прикладных исследований, средства измерения на их основе изготавливаются в виде простейших лабораторных установок. Отсутствие функционально законченных измерителей КРП сдерживает их тиражирование и широкое внедрение.

В методе Кельвина–Зисмана вибрирующий чувствительный элемент (эталонная поверхность) и измеряемая поверхность образуют обкладки динамического конденсатора, одна из пластин которого совершает механические колебания под действием внешнего модулятора. Вследствие различия РВЭ материалов пластин, конденсатор будет иметь заряд, пропорциональный КРП. Периодические изменения емкости конденсатора создают переменный ток в измерительной цепи, удобный для регистрации. Процедура измерения заключается в подаче на динамический конденсатор постоянного потенциала, компенсирующего КРП между обкладками конденсатора. При равенстве потенциала компенсации КРП выходной сигнал становится равным нулю. Обычно потенциал компенсации вырабатывается автоматически с помощью фазового детектирования и интегрирования сигналов с динамического конденсатора.

Показано, что одной из основных тенденций на современном этапе развития техники зондовой электрометрии является уменьшение размеров чувствительного элемента (эталонной поверхности динамического конденсатора) с целью повышения пространственной разрешающей способности метода. Это связано с постоянно возрастающими требованиями к способности обнаружения локальных «артефактов» на поверхности материалов. В этой связи интерес

представляют зонды с размерами чувствительного элемента до 1 мм. С точки зрения аналоговой электроники, емкость такого конденсатора мала и, соответственно, мал переменный ток в измерительной цепи. Кроме того, в случае измерения КРП, динамический конденсатор представляет собой открытую систему, экранирование которой затруднительно. Зонд Кельвина подвержен влиянию ряда дестабилизирующих факторов (собственные шумы, электромагнитные наводки, паразитные емкостные связи и др.), влияние которых тем больше, чем меньше измеряемые токи. При приближении потенциала компенсации к измеряемой КРП соотношение сигнал/шум уменьшается, и в области компенсации становится меньше единицы. Поэтому компенсационная зависимость традиционных аналоговых измерителей КРП имеет область неопределенности и аналоговые измерители КРП характеризуются значительной погрешностью.

Требуемая точность (менее,  $\pm 1$  мВ) достигается повышением постоянной времени цепи автокомпенсации, которая включает фазовый детектор и интегратор. Типичное время одного измерения составляет величину порядка нескольких секунд. В сканирующих системах для получения качественного визуализированного изображения пространственного распределения электростатического потенциала требуется регистрация большого количества отсчетов (до десятков тысяч). Поэтому в сканирующих измерителях КРП время одного измерения наряду со скоростью перемещения зонда имеет существенное значение. Повышение производительности измерений сопряжено с потерей чувствительности. Сделан вывод о целесообразности проведения дополнительных исследований формирования измерительного сигнала, принципов измерения и функциональных структур измерительных схем измерителей КРП, направленных на повышение производительности измерений без потери точности.

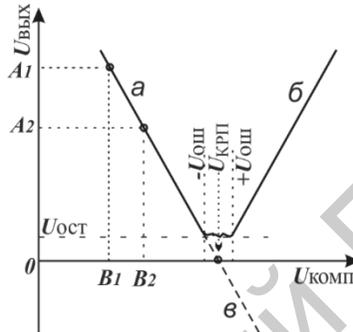
Анализ литературных данных показал, что, в отличие от идеального, в реальном динамическом конденсаторе существует зависимость соотношения сигнал/шум от изменения расстояния между его пластинами. Наилучшее соотношение сигнал/шум достигается при условии, когда расстояние «зонд-образец» значительно меньше диаметра зонда. При сканировании поверхности с помощью зонда Кельвина или непрерывном контроле технологических процессов обработки поверхности, в том числе при трении, вследствие геометрической неоднородности измеряемой поверхности выдержать расстояние «зонд-образец» постоянным достаточно сложно. Сделан вывод о целесообразности использования автоматической подстройки расстояния «зонд-образец».

На основании анализа состояния вопроса в рассматриваемой области и выявленных проблем, определены объект и предмет диссертационных исследований, а также сформулированы его цель и задачи.

**Во второй главе** приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерности формирования измерительного сигнала динамического конденсатора в системах с фазовой автокомпенсацией и анализируются факторы, составляющие погрешность измерения КРП.

Экспериментальные исследования показали, что компенсационная зависимость измерительного динамического конденсатора  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{комп}})$  (схематично показана на рисунке 1) линейно уменьшается с приближением потенциала компенсации ( $U_{\text{комп}}$ ) к КРП (рисунок 1, ветвь *a*) и, в идеальном случае, достигает нулевого значения при ( $U_{\text{комп}} + U_{\text{КРП}} = 0$ ). При дальнейшем повышении потенциала компенсации,  $U_{\text{вых}}$  линейно возрастает (рисунок 1, ветвь *b*)

и компенсационная зависимость приобретает характерный V-образный вид. Это справедливо только для амплитудного детектирования. При переходе потенциала компенсации через значение КРП, полярность пластин измерительного динамического конденсатора изменяется на противоположную, и, соответственно, фаза выходного сигнала изменяется на  $180^\circ$  (рисунок 1, ветвь в). На этом принципе основана фазовая автокомпенсация измеряемой величины в аналоговых измерителях КРП.



**Рисунок 1. – Схематичное представление компенсационной зависимости измерительного динамического конденсатора при фазовом (а–в) и амплитудном (а–б) детектировании**

В окрестности точки компенсации амплитуда сигнала уменьшается, соотношение сигнал/шум становится меньше единицы, и скомпенсировать выходной сигнал полностью не представляется возможным (рисунок 1). Погрешность от неполной компенсации в системах с фазовой автокомпенсацией, в соответствии с рисунком 1 будет определяться выражением:

$$U_{\text{ош}} = \frac{U_{\text{ост}}}{KA_{12}}, \quad (1)$$

где  $KA_{12} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{комп}}}$  – совместный коэффициент усиления  $K$  и преобразования  $A_{12}$  динамического конденсатора;

$U_{\text{ост}}$  – минимальное значение, до которого возможно скомпенсировать выходной сигнал.

Анализ факторов, составляющих погрешность измерения КРП, показал, что такие из них как собственные шумы, а также различные электромагнитные наводки на вход измерительного динамического конденсатора, вносят вклад в область неопределенности, не зависящий от положения точки компенсации. Следовательно, они могут быть исключены или минимизированы с помощью соответствующих схемотехнических решений и дополнительного экранирования. Наиболее существенен и практически не устраним вклад в погрешность от паразитных динамических конденсаторов, образованных вибрирующим зондом и стенками или другими элементами измерительной схемы. В этом случае упрощенное выражение, описывающее переменный выходной сигнал динамического конденсатора будет иметь вид

$$i(t) = \varepsilon_0 \omega d_m S \left( \frac{U_{\text{комп}} + U_{\text{КРП}}}{d_o^2} + \frac{U_{\text{комп}} + U_{1j}}{d_{oj}^2} \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$\omega$  – циклическая частота механической вибрации зонда;

$d_m$  – амплитуда модуляции;

$S$  – площадь чувствительного элемента;

$d_o$  – расстояние между зондом и измеряемой поверхностью;

$d_{oj}$  – расстояние между зондом и  $j$ -ым элементом измерительной головки, индекс  $j \geq 3$  относится к элементам конструкции измерительной головки, образующих с измерительным зондом паразитные динамические конденсаторы емкостью  $C_{1j}$  и паразитными КРП  $U_{1j}$ , т.е. составляющие погрешности от паразитных динамических конденсаторов, зависят от потенциала компенсации.

Выражение (2) также показывает зависимость аддитивного выходного сигнала, включающего составляющие полезного и паразитного сигналов, от изменения расстояния  $d_o$  между зондом и измеряемой поверхностью. Вследствие изменения расстояния соотношение сигнал/шум будет также изменяться, что будет вносить дополнительную погрешность в результаты измерения.

Из-за влияния описанных паразитных факторов, аналоговые измерители КРП имеют область неопределенности и значительную погрешность. Для осуществления автоматической компенсации измеряемой величины требуется фазовое детектирование и интегрирование сигнала (с постоянной времени, не менее нескольких секунд). Быстродействие и точность измерения КРП имеет существенное значение, особенно, для сканирующих систем.

В работе предложен новый метод измерения КРП. Как было показано выше (рисунок 1), компенсационная зависимость измерительного динамического конденсатора представляет собой прямую линию в области больших сигналов, то есть выходной сигнал описывается выражением вида

$$i(t) = (U_{\text{КРП}} + U_{\text{комп}}) \frac{\partial C(t)}{\partial t}. \quad (3)$$

Поэтому для определения КРП достаточно определить параметры линейной ветви компенсационной зависимости и путем аппроксимации вычислить точку ее пересечения с осью абсцисс. Для этого достаточно определить, амплитуды переменных сигналов  $A_1$  и  $A_2$  (рисунок 1) при, как минимум, двух различных заданных потенциалах компенсации  $B_1$  и  $B_2$ , и из уравнения прямой, проходящей через две не совпадающие точки, вычислить КРП

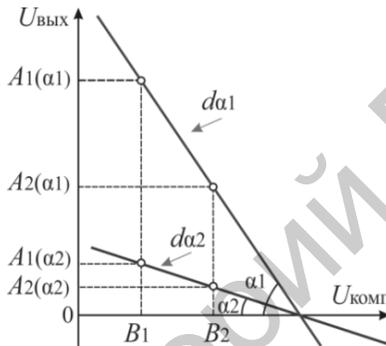
$$U_{\text{КРП}} = - \frac{B_1 A_2 - B_2 A_1}{A_1 - A_2}. \quad (4)$$

Преимущество предложенного метода заключается в том, что измерительный динамический конденсатор работает в области больших сигналов, при большом соотношении сигнал/шум, что априори повышает точность измерения КРП, а также исключает область неопределенности, имеющуюся в аналоговых измерителях. Новизна метода защищена патентом [37].

Исследования показали, что при изменении зазора  $d_o$  измерительного динамического конденсатора, изменяется угловой коэффициент компенсационной зависимости (рисунок 2), т.е. изменение расстояния  $\Delta d$  между измерительным зондом и измеряемой поверхностью обратно пропорциональны разности между тангенсами углов наклона компенсационной прямой:

$$\operatorname{tg}\alpha_1 - \operatorname{tg}\alpha_2 = \varepsilon\omega S d_m \left( \frac{1}{d_{\alpha_1}^2} - \frac{1}{d_{\alpha_2}^2} \right), \quad (5)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы наклона компенсационной зависимости и от расстояния между зондом и измеряемой поверхностью  $d_{\alpha_1}$  и  $d_{\alpha_2}$ , соответственно.



**Рисунок 2. – Принцип определения изменения расстояния между пластинами динамического конденсатора по угловому коэффициенту компенсационной зависимости**

На основе сказанного выше предложен способ определения расстояния в системе «зонд-образец», осуществляемый по угловому коэффициенту компенсационной зависимости измерительного динамического конденсатора.

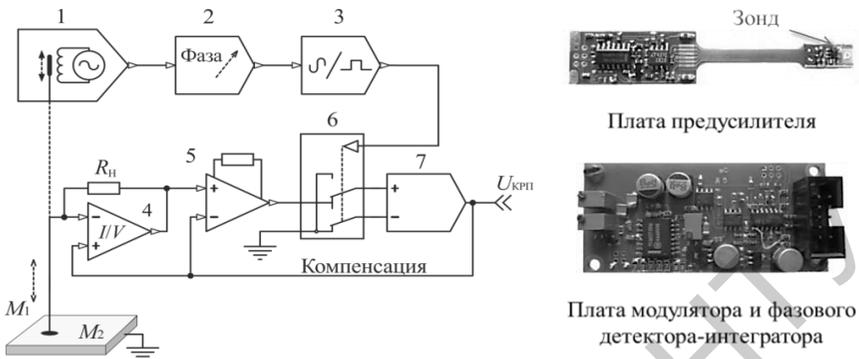
Угловой коэффициент  $k$  может быть вычислен одновременно со значением КРП в едином измерительном цикле:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{A_1 - A_2}{B_1 - B_2}. \quad (6)$$

Такой подход позволяет осуществлять автоподстройку зазора измерительного динамического конденсатора и автоматический подвод зонда к измеряемой поверхности, а также картографировать отклонения геометрических размеров образца в процессе сканирования потенциала поверхности.

**В третьей главе** рассмотрены принципы построения малогабаритных функционально законченных аналоговых и цифровых измерителей КРП. Приводится обоснование и описание разработанных функциональных структур, их схемотехническая и конструктивная реализация.

На рисунке 3 показана структурная схема и внешний вид разработанного малогабаритного аналогового измерителя КРП. Плата предусилителя совместно с платой модулятора и фазового детектора-интегратора представляют собой функционально законченное устройство.



$M_1$  и  $M_2$  – эталонный и измеряемый образцы соответственно;  
 1 – электромеханический вибратор; 2 – фазосдвигатель; 3 – формирователь сигнала; 4 – преобразователь ток-напряжение; 5 – инструментальный усилитель, 6 – фазовый детектор; 7 – интегратор

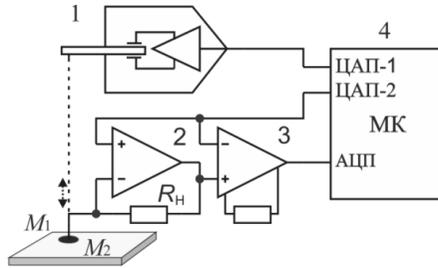
**Рисунок 3. – Структурная схема аналогового измерителя контактной разности потенциалов**

Разработанный аналоговый измеритель КРП представляет собой прецизионное измерительное устройство, на выходе которого постоянно поддерживается напряжение равное КРП. Благодаря малым габаритам и оптимизации конструкции измеритель КРП имеет высокую чувствительность и повышенную помехозащищенность в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов (механических, электромагнитных и др.). Он может быть встроен практически в любые специализированные измерительные установки, технологические линии, испытательные стенды и др.

Разработанный цифровой измеритель КРП (рисунок 4) реализует предложенный метод измерения КРП, на основе анализа компенсационной зависимости измерительного сигнала. Он выполнен на базе управляющего 32-разрядного микропроцессора с ядром *Cortex M4*. Следует отметить, что на базе таких микропроцессоров возможна прямая реализация функций аналогового измерителя КРП, то есть реализация фазового детектирования и интегрирования для автокомпенсации измеряемой величины. Однако при этом основные недостатки аналогового измерителя КРП останутся.

В микроконтроллере 4 (рисунок 4) цифро-аналоговый преобразователь ЦАП<sub>1</sub> использован для генерации синусоидального сигнала, который с помощью блока модулятора 1 (мощный драйвер и пьезопластина), задает вибрацию зонда. ЦАП<sub>2</sub> с соответствующим драйвером вырабатывает напряжение компенсации. Предварительный усилитель 2 выполнен по схеме преобразователя ток-напряжение и образован операционным усилителем с предельно малым током утечки по входу и низким дрейфом напряжения смещения. Инструментальный усилитель 3 убирает из выходного сигнала постоянный уровень (напряжение компенсации).

Полный измерительный цикл состоит из двух (или более) последовательных определений амплитуд сигнала при поочередной подаче различных напряжений компенсации и последующего вычисления КРП.



$M_1$  и  $M_2$  – эталонный и измеряемый образцы соответственно;  
 1 – блок модулятора; 2 – преобразователь ток-напряжение;  
 3 – инструментальный усилитель; 4 – микроконтроллер

Рисунок 4. – Структурная схема цифрового измерителя контактной разности потенциалов

Обобщенный алгоритм работы цифрового измерителя КРП приведен на рисунке 5. Внутренний таймер микроконтроллера осуществляет предварительное деление тактовой частоты до величины в 128 раз большей частоты вибрации зонда. Импульсы таймера по каналу прямого доступа к памяти управляют считыванием и переносом таблицы синуса в ЦАП<sub>1</sub>. Одновременно, импульсы таймера запускают аналого-цифровой преобразователь и с помощью прямого доступа к памяти записывают полученные отсчеты ЦАП<sub>2</sub> в буфер памяти. Массив данных в режиме реального времени обрабатывается средствами внутреннего арифметического сопроцессора. Рассчитывается среднеквадратичное значение амплитуды сигнала или спектр сигнала методом быстрого преобразования Фурье. Оба метода расчета позволяют отстроиться от случайных помех и паразитных гармоник сигнала. Вычисление амплитуды целесообразно осуществлять по четырем периодам колебания зонда, т.е. по 512 точкам.

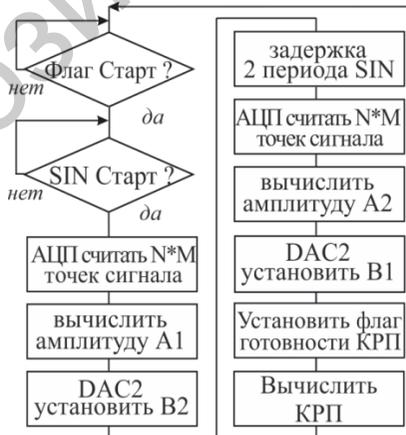
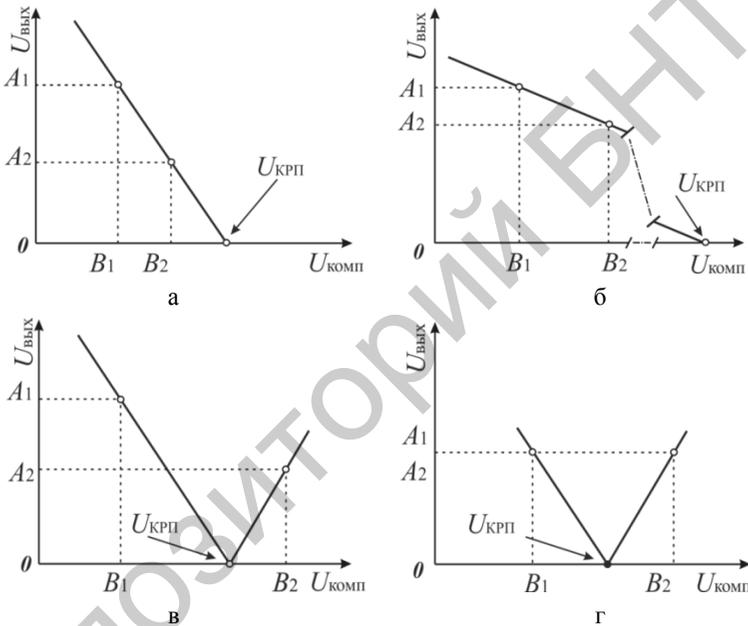


Рисунок 5. – Обобщенный измерительный алгоритм цифрового измерителя контактной разности потенциалов

Выполнение математических операций не занимает существенного времени. Например, при частоте колебаний зонда 500 Гц время одного измерения составляет 0,02 секунды, что более чем в 50 раз меньше чем в аналоговом измерителе КРП. Следует также отметить, что в разработанном цифровом измерителе КРП не требуется использование фазовой следящей системы. Микропроцессор также может управлять перемещением зонда в сканирующих системах, осуществлять передачу данных на хост-компьютер по стандартным интерфейсам и другие вспомогательные функции.

Цифровой измеритель КРП при соответствующем перепрограммировании микроконтроллера обеспечивает четыре режима работы (рисунок 6).



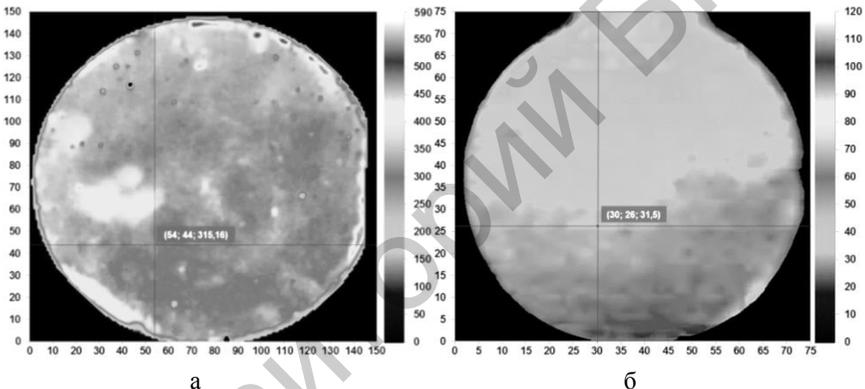
**а** – базовый режим; **б** – режим измерения высоковольтной КРП (до нескольких сотен вольт); **в** – режим измерения по двум ветвям компенсационной зависимости; **г** – режим с предварительным выбором потенциалов компенсации на равном удалении от контактной разности потенциалов

**Рисунок 6.** – Режимы работы цифрового измерителя контактной разности потенциалов

Режим измерения высоковольтной КРП (рисунок 6, б) позволяет определять КРП в широком диапазоне возможных потенциалов измеряемого образца, достигающих до десятков и сотен вольт. Ранее при использовании аналоговых измерителей КРП возникли проблемы применения метода. Аналоговый измеритель КРП требует подачи на эталонный образец напряжения компенсации равного потенциалу измеряемой поверхности, что на практике трудно выполнимо. В цифровом измерителе КРП на эталонный образец подаются потенциалы компенсации, не превышающие 10 В.

В четвертой главе приведены характерные результаты решения практических задач с применением аналоговых и цифровых измерителей КРП для исследования, неразрушающего контроля, диагностики и испытания функциональных материалов по параметрам пространственного распределения потенциала поверхности. Приводится описание дополнительного оборудования для сканирования электростатического потенциала поверхности и непрерывного контроля поверхностей при трении пары твердых тел, оснащенного разработанными измерителями КРП. Для проверки применимости развиваемых в исследовании подходов в качестве опытных образцов были выбраны полупроводники, металлы и диэлектрики (рисунки 7, 8).

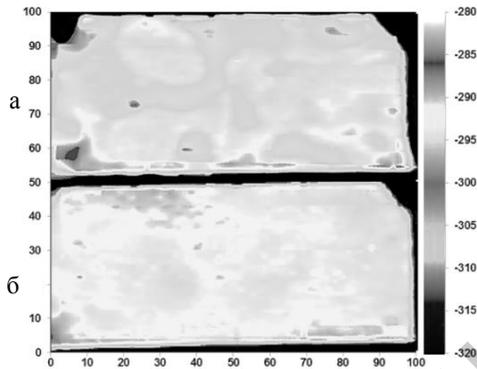
На рисунке 7, а приведена топология распределения РВЭ полупроводниковой пластины марки КДБ-10 покрытой оксидом кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Результаты исследования показали неоднородность распределения свойств по поверхности полупроводниковой пластины, в общем случае, не регистрируемые другими методами анализа поверхности, включая оптические.



**Рисунок 7. – Топология распределения работы выхода электрона поверхности полупроводниковой пластины (а) и топология распределения электростатического потенциала полимерного образца (б)**

На рисунке 7, б приведены результаты сканирования электростатического потенциала поверхности полимерного материала на основе ПА-6. Исследования показали, что изменение структурного состава композиционных материалов на основе полимеров сопровождается соответствующими изменениями, как величины электростатического потенциала, так и его распределения по измеряемой поверхности.

На рисунке 8 приведены топология распределения РВЭ металлических образцов с поверхностями 12 (рисунок 8, а) и 14 (рисунок 8, б) классом чистоты, обработанными по технологии алмазного наноточения. Исследования показали, что РВЭ и ее относительные отклонения по поверхности характеризуют однородность физико-химических свойств поверхности и в совокупности с геометрическими характеристиками, позволяют в полной мере контролировать достижение заданных эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий из металлов и сплавов с оптической чистотой поверхности.



**Рисунок 8. – Топологии распределения РВЭ поверхности образцов из алюминиевого сплава АМg2 с 12 (а) и 14 (б) классом чистоты**

Для реализации комплексного исследования процессов трения и контроля состояния трущейся поверхности разработана установка торцевого трения, оснащенная датчиками момента трения, линейного износа, температуры в зоне трения, а также аналоговым измерителем КРП. Приведены результаты выполненных исследований электростатического потенциала трущейся поверхности, а также при воздействии разрушающих механических нагрузок.

**В Приложении** представлены документы, свидетельствующие о практическом использовании результатов диссертационной работы в научных исследованиях, неразрушающем контроле и учебном процессе.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработан новый не компенсационный метод измерения контактной разности потенциалов, заключающийся в определении параметров компенсационной зависимости измерительного динамического конденсатора по амплитудам выходного переменного сигнала при двух и более последовательно заданных фиксированных потенциалах компенсации, и последующем вычислении контактной разности потенциалов методом линейной аппроксимации [8, 26]. Разработанный метод позволяет минимизировать влияние паразитных факторов (шумов, наводок и т.д.) и позволяет исключить область неопределенности, имеющуюся в методе Кельвина–Зисмана. Метод защищен положительным решением на выдачу патента Евразии [37] и реализован в цифровых измерителях контактной разности потенциалов и электростатического потенциала диэлектриков.

2. Разработанный цифровой измеритель контактной разности потенциалов не требует фазового детектирования и интегрирования сигнала измерительного динамического конденсатора [8, 35]. Это исключает ошибки следящей системы и аналого-цифрового преобразования, имеющиеся в аналоговом измерителе, и, в зависимости от частоты модуляции динамического конденсатора, сокращает время одного измерения в 20–50 раз. Время измерения имеет

существенное значение в системах сканирования и картирования потенциала поверхности, когда требуется регистрация большого количества отсчетов (десятков тысяч).

3. Разработан цифровой измеритель электростатического потенциала диэлектриков, работающий в широком диапазоне возможных потенциалов измеряемого образца (до сотен вольт) [7, 15–17, 29]. В отличие от аналогового, в цифровом измерителе электростатического потенциала не требуется приложение к измерительному динамическому конденсатору потенциала компенсации, эквивалентного электростатическому потенциалу диэлектрика, что ранее являлось трудновыполнимым на практике. В разработанном измерителе электростатического потенциала диэлектриков достаточна подача потенциала к измерительному динамическому конденсатору, не превышающего  $\pm 10$  В.

4. Предложен способ определения расстояния между измеряемым и эталонным образцом, заключающийся в определении углового коэффициента компенсационной зависимости измерительного динамического конденсатора. Угловой коэффициент определяется в режиме реального времени одновременно с измерением контактной разности потенциалов [27]. Регистрация изменения углового коэффициента от изменения зазора измерительного динамического конденсатора позволяет выполнять автоподвод зонда к измеряемой поверхности, автоподстройку зазора и, в случае необходимости, определять отклонения геометрического профиля измеряемой поверхности в одном цикле с определением потенциала поверхности при работе измерителей в сканирующих системах.

5. Разработаны принципы технической унификации (структурной, схемотехнической и конструктивной) малогабаритных полностью сформированных аналоговых [6, 28] и цифровых [8, 24] измерителей контактной разности потенциалов широкого функционального назначения. На базе разработанных унифицированных измерителей возможно построение различных специализированных устройств и установок, как для контроля долговременных изменений потенциала поверхности [2, 3, 5, 10–14, 20, 21, 25, 30–36], так и для зондового картирования потенциала поверхности различных материалов (металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков) [4, 7, 9, 22, 23].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные в диссертационной работе научно-технические решения рекомендуются использовать в новых разработках научного оборудования, а также оборудования для неразрушающего контроля и диагностики прецизионных поверхностей в различных областях современного материаловедения.

Комплекс зондовых зарядочувствительных приборов и методов для диагностики, мониторинга и визуализации прецизионных поверхностей, разработанный в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ на базе разработанных в диссертации цифровых измерителей контактной разности потенциалов, отмечен дипломом II степени на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка 2014 года», Санкт-Петербург 2014г.

Разработанные цифровые измерители контактной разности потенциалов использовались в установках сканирования полупроводниковых пластин СКАН-2013 (по рисунку 6, а) и СКАН-2015 (по рисунку 6, в), разработанных в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ для ОАО «ИНТЕГРАЛ» (Минск).

Разработанные в диссертационной работе методы измерения и принципы технической унификации средств измерений использованы в учебном процессе на кафедре «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ.

Разработанная программа и методика измерения пространственного распределения собственного и/или приобретенного в результате внешних воздействий электростатического потенциала функциональных материалов на основе полимеров МИ. ЦМОП 424115.013.023-2016 может быть использована в научно-исследовательских и заводских лабораториях в качестве методического обеспечения научных исследований, контроля и сертификации материалов.

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'МВ' followed by a flourish.

Репозиторий БНТУ

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Монографии**

1. Жарин, А. Л. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследовании свойств перспективных материалов / А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, А. К. Тявловский // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т.; Витебский гос. тех. ун-т; ред. В. В. Клубович. – Витебск, 2015. – Т. 1. – С. 381–394.

**Статьи в рецензируемых научных изданиях**

2. Пантелеев, К. В. Методы измерений работы выхода электрона для контроля состояния поверхностей в процессе трения / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 2(9). – С. 107–113.

3. Пантелеев, К. В. Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1 (10). – С. 56–63.

4. Шаронов, Г. В. Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона / Г. В. Шаронов, А. Л. Жарин, Н. И. Мухуров, К. В. Пантелеев // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 196–203.

5. Жарин, А. Л. Исследование локальных деформаций материалов методами зондовой электрометрии при различных видах нагружения / А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, А. И. Свистун // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборн. научн. трудов: в 3 кн.; Физ. техн. ин-т НАН Беларуси; ред. кол. С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Кн. 1. – С. 39–46.

6. Пантелеев, К. В. Построение измерителей контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.

7. Неразрушающий контроль изделий с прецизионными поверхностями на основе методов зондовой электрометрии / Р. И. Воробей, О. К. Гусев, А. В. Дубаневич, А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский, К. Л. Тявловский // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 4–17.

8. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.

9. Pantsialeyeu, K. U. Charge sensitive techniques in control of the homogeneity of optical metallic surfaces / K. Pantsialeyeu, A. Zharin, K. Kierczynski // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – R. 92, №8. – P. 190–193.

10. Pantsialeyeu, K. U. Charge sensitive techniques in tribology studies / K. Pantsialeyeu, A. Zharin, K. Kierczynski // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – R. 92, № 11. – P. 239–243.

**Статьи в сборниках материалов научных конференций**

11. Пантелеев, К. В. Исследование кинетики процессов усталостного разрушения при трении зарядочувствительными методами / К. В. Пантелеев, А. В. Дубаневич, А. Л. Жарин // Актуальные проблемы прочности: материалы 55 междунар. конф., Харьков, 9–13 июня 2014 г., / ХФТИ НАН Украины, ред-

кол.: В. Н. Воеводин (гл. ред.) [и др.]. – Харьков, 2014. – С. 161.

12. Пантелеев, К. В. Применение метода контактной разности потенциалов для непрерывного мониторинга состояния трущейся поверхности / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Трибология и Надёжность: сб. тр. 14 Международ. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 17–19 сентября 2014 г. ; НИУ ИТМО ; ред. кол. К. Н. Войнов (гл. ред.) [и др.]. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 190–200.

13. Пантелеев, К. В. Диагностика узлов трения методом контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сентября 2014 г. / Бел.-Росс. ун-т ; редкол.: А. Р. Баев (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 224–225.

14. Пантелеев, К. В. Диагностика модифицированной трением поверхности композитов на основе ПТФЭ по плотности распределения поверхностного потенциала / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сентября 2014 г. / Бел.-Росс. ун-т ; редкол.: А. Р. Баев (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 252–254.

15. Пантелеев, К. В. Исследования пространственного распределения статического потенциала поверхностей трения металлополимерных сопряжений / К. В. Пантелеев, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборостроение: материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 ноября 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – С. 110–112.

16. Пантелеев, К. В. Исследования сплошности покрытий из графита и политетрафторэтилена на металле сканирующим методом динамического конденсатора / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Новые направления развития приборостроения: материалы Восьмой междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 апреля 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 6.

17. Пантелеев, К. В. Методика исследования сплошности покрытий на металле зарядочувствительными методами / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Новые направления развития приборостроения: материалы Восьмой междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 апреля 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 51.

18. Пантелеев, К. В. Зарядочувствительный метод исследования напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев металла при нагружении / К. В. Пантелеев, А. В. Дубаневич, А. Л. Жарин // Перспективные материалы и технологии: материалы Четвертого междунар. симпозиума, Витебск, 27–29 мая 2015 г. / Витеб. гос. техн. ун-т; редкол.: В. В. Клубович (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2015. – С. 267–270.

19. Пантелеев, К. В. Экспериментальные исследования локализации деформации в металлах по топологии работы выхода электрона / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, Жарин // Перспективные материалы и технологии: материалы Четвертого междунар. симп., Витебск, 27–29 мая 2015 г. / Витеб. гос. техн. ун-т. – Витебск, 2015. – С. 270–273.

20. Исследование процессов трения зарядочувствительными методами / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин, А. К. Тявловский, А. И. Свистун // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч. техн. конф.,

Новополоцк, 28–29 октября 2015 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: А. И. Гордиенко, В. К. Шелег. – Новополоцк, 2015. – С. 147–150.

21. Аппаратно-программный комплекс исследования процессов на поверхности твердого тела при трении / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин, А. К. Тявловский, А. И. Свистун // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 28–29 октября 2015 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: А. И. Гордиенко, В. К. Шелег. – Новополоцк, 2015. – С. 144–147.

22. Шаронов, Г. В. Контроль качества оптических металлических поверхностей, обработанных по технологии алмазного наноточения, по распределению работы выхода электрона / Г. В. Шаронов, А. Л. Жарин, Н. И. Мухуров, К. В. Пантелеев // Приборостроение: материалы восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 ноября 2015 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Т1. – С. 161–163.

23. Пантелеев, К. В. Исследование полимерных материалов зарядочувствительным методом / К. В. Пантелеев, Ю. М. Кривогуз, А. Л. Жарин // Приборостроение: материалы восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 ноября 2015 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Т1. – С. 134–136.

24. Пантелеев, К. В. Первичный преобразователь контактной разности потенциалов по методу Кельвина–Зисмана / К. В. Пантелеев, А. К. Тявловский // Новые направления развития приборостроения: материалы Девятой междунар. науч.-техн. студ. и мол. уч., Минск, 21–22 апреля 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 56.

25. Пантелеев, К. В. Применение динамического конденсатора для бесконтактной диагностики усталостного разрушения трущейся поверхности / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Новые направления развития приборостроения: материалы Девятой междунар. науч.-техн. студ. и мол. уч., Минск, 21–22 апреля 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 57.

26. Пантелеев, К. В. Моделирование зависимости измерительного сигнала от потенциала компенсации в методе Кельвина–Зисмана / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Приборостроение: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 106–108.

27. Пантелеев, К. В. Управление расстоянием между обкладками динамического конденсатора в методе Кельвина–Зисмана / К. В. Пантелеев, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборостроение: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 108–110.

28. Микитевич, В. А. Малогабаритный аналоговый измеритель контактной разности потенциалов / В. А. Микитевич, К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Приборостроение: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 97–99.

29. Измерение пространственного распределения высоковольтного электростатического потенциала полимерных материалов цифровым зондом Кельвина / К. В. Пантелеев, А. В. Дубаневич, А. Л. Жарин, А. В. Кравцевич, Л. И. Шашура // Приборостроение: материалы Девятой междунар. науч.-техн.

конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 110–112.

30. Алгоритмы обработки визуализированных изображений при картировании дефектов полупроводниковых пластин / А. К. Тявловский, А. Л. Жарин, О. К. Гусев, Р. И. Воробей, К. Л. Тявловский, К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, В. А. Пилипенко, А. Н. Пеглицкий // Приборостроение: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 391–393.

### **Тезисы докладов научных конференций**

31. Пантелеев, К. В. Особенности исследований поверхности металлов при граничном трении по работе выхода электрона / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. Третьей Респуб. науч.-техн. конф. мол. уч., Гомель, 4–6 ноября 2014 г. / ИММС НАН Беларуси; редкол.: И. Н. Ковалева (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 100–101.

32. Пантелеев, К. В. Метод определения вида контактной деформации в тонких поверхностных слоях металла по работе выхода электрона / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. Третьей Респуб. науч.-техн. конф. мол. уч., Гомель, 4–6 ноября 2014 г. / ИММС НАН Беларуси; редкол.: И. Н. Ковалева (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 98–99.

33. Пантелеев, К. В. Зарядочувствительные методы исследования процессов трения / К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, А. Л. Жарин // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Девятой междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–26 июня, 2015 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериха (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 102.

34. Пантелеев, К. В. Мониторинг работы выхода электрона поверхности трения при износостаростных испытаниях / К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, А. Л. Жарин // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Девятой междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–26 июня, 2015 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериха (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 103.

35. Пантелеев, К. В. Повышение производительности измерений по методу Кельвина–Зисмана / К. В. Пантелеев, А. К. Тявловский, А. В. Дубаневич, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Приладобудовання: стан і перспективи: зб. тез. 15 міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 17–18 травня 2016 г. / Нац. техн. ун-т Укр. «Київ. політехн. Ін-т». – Киев, 2016. – С. 173–174.

36. Пантелеев, К. В. Анализ усталостного разрушения металлов по периодическим изменениям работы выхода электрона трущейся поверхности / К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Актуальные проблемы прочности: сб. тез. 57 междунар. конференции, 24–27 мая, 2016 г. / Сев. гос. ун-т. – Севастополь, 2016. – С. 189.

### **Патенты и заявки на изобретения**

37. Способ измерения контактной разности потенциалов: пат. ЕА 201500105/26 / О. К. Гусев, Р. И. Воробей, А. Л. Жарин, А. И. Свистун, А. К. Тявловский, К. Л. Тявловский, К. В. Пантелеев, А. В. Дубаневич. – Опубл. 21.01.2015.

## РЭЗЮМЭ

Панцялеяў Канстанцін Уладзіміравіч

Метады і сродкі вымярэння кантактнай рознасці патэнцыялаў на аснове аналізу кампенсацыйнай залежнасці зонда Кельвіна

**Ключавыя словы:** кантактная рознасць патэнцыялаў, электростатычны патэнцыял, праца выхаду электрона, паверхня, зонд Кельвіна, метады Кельвіна–Зісмана, кампенсацыйная залежнасць.

**Мэта працы:** распрацоўка уніфікаваных малагабарытных функцыянальна сфармаваных вымяральных прылад і метадаў вымярэння кантактнай рознасці патэнцыялаў, якія валодаюць палепшанымі дакладнасцю, адчувальнасцю і хуткадзейнасцю.

**Метады даследавання:** матэматычнае і фізічнае мадэляванне выхаднога сігнала зонда Кельвіна, камп'ютэрнае мадэляванне і эксперыментальная прапрацоўка схематэчнага дызайну, функцыянальных структур і канструкцый аналагавых і лічбавых зондаў Кельвіна, эксперыментальныя даследаванні прасторавага размеркавання патэнцыялу паверхні з дапамогай сканавальных вымяральных сістэм і непасрэдна ў працэсе трэння паверхні.

**Атрыманая вынікі і іх навізна.** Прапанаваны новы не кампенсацыйны метады вымярэння кантактнай рознасці патэнцыялаў. Распрацаваны лічбавы вымяральнік кантактнай рознасці патэнцыялаў, які не патрабуе фазавога дэтэктавання і інтэгравання сігнала вымяральнага дынамічнага кандэнсатара. Распрацаваны лічбавы вымяральнік электростатычнага патэнцыялу дыэлектрыкаў, які працуе ў шырокім дыяпазоне дапушчальных патэнцыялаў паверхні (да сотняў вольт). Упершыню прапанаваны спосаб вымярэння адлегласці ў сістэме «зонд-паверхня» па кутняму каэфіцыенту кампенсацыйнай залежнасці, які дазваляе ў адным цыкле з вымярэннем кантактнай рознасці патэнцыялаў выконваць аўтападвод і аўтападладку зонда, і, пры неабходнасці, вырабляць паstraенне геаметрычнага профілю пры сканаванні патэнцыялу паверхні. Распрацаваны прынцыпы тэхнічнай уніфікацыі малагабарытных функцыянальна сфармаваных лічбавых і аналагавых вымяральнікаў кантактнай рознасці патэнцыялаў шырокага назначэння, на базе якіх магчыма паstraенне розных вымяральных прылад і сістэм, як для картавання патэнцыялу паверхні, так і для бесперапыннага кантролю розных тэхналагічных працэсаў.

**Ступень выкарыстання.** Распрацаваныя ў рамках дысертацыйнай работы навукова-тэхнічныя рашэнні рэкамендуюцца выкарыстоўваць у новых распрацоўках навуковага абсталявання, а таксама абсталявання для неразбуральнага кантролю прэцызійных паверхняў у розных галінах сучаснага матэрыялазнаўства.

**Галіна прымянення:** аналіз і дыягнаставанне уласцівасцяў паверхні канструкцыйных і функцыянальных матэрыялаў (металаў, сплаваў, паўправаднікоў і дыэлектрыкаў), паўправаднікова тэхніка і мікраэлектроніка, лазерная тэхніка, трыботэхніка і іншыя галіны машынабудавання, убудавальныя датчыкі кантролю розных тэхналагічных працэсаў, у тым ліку працэсаў трэння.

## РЕЗЮМЕ

Пантелеев Константин Владимирович

Методы и средства измерения контактной разности потенциалов на основе анализа компенсационной зависимости зонда Кельвина

**Ключевые слова:** контактная разность потенциалов, электростатический потенциал, работа выхода электрона, поверхность, зонд Кельвина, метод Кельвина–Зисмана.

**Цель работы:** разработка унифицированных малогабаритных функционально законченных измерительных устройств и методов измерения контактной разности потенциалов, обладающих улучшенными точностными характеристиками, чувствительностью и быстродействием.

**Методы исследования:** математическое и физическое моделирование компенсационной зависимости зонда Кельвина, компьютерное моделирование и экспериментальная проработка схемотехнического дизайна, функциональных структур и конструкций аналоговых и цифровых измерителей контактной разности потенциалов, экспериментальные исследования пространственного распределения потенциала поверхности с помощью сканирующих измерительных систем и непосредственно в процессе трения поверхности.

**Полученные результаты и их новизна.** Предложен новый не компенсационный метод измерения контактной разности потенциалов. Разработан цифровой измеритель контактной разности потенциалов, не требующий фазового детектирования и интегрирования сигнала измерительного динамического конденсатора. Разработан цифровой измеритель электростатического потенциала диэлектрика, работающий в широком диапазоне допустимых потенциалов измеряемой поверхности (до сотен вольт). Впервые предложен способ измерения расстояния в системе «зонд-образец» по угловому коэффициенту компенсационной зависимости, позволяющий в одном цикле с измерением контактной разности потенциалов выполнять автоподвод и автоподстройку зонда, и, при необходимости, производить построение геометрического профиля при сканировании потенциала поверхности. Разработаны принципы технической унификации малогабаритных функционально сформированных цифровых и аналоговых измерителей контактной разности потенциалов широкого назначения, на базе которых возможно построение различных измерительных устройств и систем, как для картирования потенциала поверхности, так и для непрерывного контроля различных технологических процессов.

**Степень использования.** Разработанные в рамках диссертационной работы научно-технические решения рекомендуются использовать в новых разработках научного оборудования, а также оборудования для неразрушающего контроля прецизионных поверхностей в различных областях современного материаловедения

**Область применения:** анализ и диагностирование свойств поверхности конструкционных и функциональных материалов (металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков), полупроводниковая техника и микроэлектроника, лазерная техника, триботехника и другие отрасли машиностроения, встраиваемые датчики контроля различных технологических процессов, в том числе процессов трения.

## SUMMARY

Kanstantsin U. Pantsialeyeu

Methods and means of contact potential difference measurements based on the analysis of the compensation depending the Kelvin probe

**Key words:** Contact potential difference, Electrostatic potential, Electron work function, Surface, Kelvin probe, Kelvin–Zisman method, Compensatory dependency.

**Goal of the work:** development of unified compact functionally complete instruments and methods of measurement of the contact potential difference, with improved accuracy characteristics, sensitivity and speed of measurement.

**Research methods:** mathematical and physical modeling of the compensation according of the Kelvin probe, computer simulation and experimental study of circuit design, functional structures and construction of analog and digital Kelvin probes, experimental studies of spatial parameters of the surface potential distribution using scanning systems and directly in the friction process.

**The received results and their novelty.** A new non-compensating method for measuring the contact potential difference. A digital Kelvin probe does not require a phase detection and integration of vibration capacitor signal. A digital Kelvin probe capable of measuring surface potential in a wide range of admissible potentials measured surface (up to hundreds of volts). For the first time provides a method for measuring of the probe-sample distance on the slope of the compensation depending allowing in one cycle of the contact potential difference measurements are performed auto-supply, auto correction of the probe, and to make the build the geometric surface profile of the surface potential scanning, if it necessary. For the first time provides a method for measuring the distance in the system probe-sample that allows on one signal and in one measurement cycle with a contact potential difference measurements are made to build the geometric surface profile, perform auto-supply and auto- correction of the probe when the gap in the scanning process. The principles of design of unified functionally formed miniature digital and analog Kelvin probes between the general-purpose, on the basis of which it is possible to build various measuring devices and systems for mapping the surface potential, and for the continuous monitoring of various technological processes.

**Degree of application:** developed as part of dissertation work scientific and technical solutions are recommended to use in new developments of scientific equipment and equipment for non-destructive testing of precision surfaces in various fields of modern materials.

**Field of application:** analysis and diagnostics of the surface properties of structural and functional materials (metals, alloys, semiconductors and dielectrics), semiconductor electronics and microelectronics, laser technology, tribotechnics and other branches of engineering, built-in sensors of monitor of technology processes and friction processes.

Научное издание

ПАНТЕЛЕЕВ Константин Владимирович

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ  
ПОТЕНЦИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОМПЕНСАЦИОННОЙ  
ЗАВИСИМОСТИ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения

Подписано в печать 21.12.2016. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 80. Заказ 1086.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изделий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г Минск.