

На правах рукописи



Бориков Валерий Николаевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В РАСТВОРАХ**

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения

(измерение электрических и магнитных величин)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском
Томском политехническом университете

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Муравьев Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Совлуков Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор
Гольдштейн Александр Ефремович
доктор технических наук, профессор
Бирюков Сергей Владимирович

Ведущая организация: **Национальный исследовательский
университет «Московский
энергетический институт»,
г. Москва**

Защита состоится **29 марта 2012 г. в 15 часов** на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.09 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634028, Россия, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан ___ февраля 2012 г.

Учёный секретарь совета Д212.269.09

кандидат технических наук, доцент



Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Практически во всех отраслях, деятельность которых связана с производством приборов, машин, механизмов, металлоконструкций, важнейшим видом обработки является формирование покрытий на поверхности изготавливаемых деталей. Наряду с традиционными технологиями поверхностной обработки деталей в растворах все большее применение находят технологии с использованием энергетического импульсного воздействия, в которых формируются наноструктурные неметаллические неорганические покрытия, что позволяет относить их к числу перспективных технологий получения и обработки конструкционных и функциональных наноматериалов.

Большой вклад в развитие научных исследований в этой области внесли Г.А. Марков, Л.А. Снежко и В.И. Черненко, П.С. Гордиенко, И.В. Суминов и А.В. Эпельфельд, Л.Т. Бугаенко, В.Н. Малышев, А.В. Тимошенко, П. Курц (P. Kurze) и Г. Маркс (G. Marx), Д. Албелла (J. Albella) и И. Монтеро (I. Montero), А.Л. Ерохин (A.L. Yerokhin) и др. В работах А.И. Мамаева впервые заявлено о применении импульсного энергетического воздействия в растворах, как наиболее эффективного способа формирования покрытий заданной толщины, пористости и состава на вентильных металлах и их сплавах.

Дальнейшее совершенствование, как самих этих технологий, так и необходимого для их внедрения высокопроизводительного оборудования, невозможно без создания соответствующих средств измерений и контроля параметров качества получаемого покрытия и процесса его нанесения.

Характерной особенностью процессов импульсного энергетического воздействия является большой динамический диапазон изменения электрических параметров процесса формирования покрытий: напряжений – от 100 до 1000 В и токов через границу раздела – от 10 до 10000 А при длительности импульса от 50 до 500 мкс. При малых длительностях энергетического воздействия форма импульса оказывает значительное влияние на качество покрытия, такие как толщина и пористость. Поэтому важно с достаточной для практики точностью измерять электрические параметры процесса с целью анализа формы энергетического воздействия и целенаправленного управления технологическим процессом и, следовательно, качеством покрытия определенного функционального назначения.

Знание формы сигнала воздействия и его отклика на это воздействие позволяет, используя современные информационные технологии, эффективно решать вопросы идентификации состояния системы, и, в конечном счете, определения косвенными методами качества сформированного покрытия.

Таким образом, диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи, заключающейся в разработке методов и средств измерений электрических параметров процессов при импульсном энергетическом воздействии в растворах электролита, позволяющих производить оценку качества получаемых покрытий в процессе обработки.

Актуальность работы подтверждена включением данной тематики в аналитическую ведомственную целевую программу (АВЦП) Рособразования и Федеральную целевую программу (ФЦП) Министерства образования и науки, а также в ведомственные программы Роснано и Роскосмос.

Цель диссертационной работы заключается в создании методов и средств анализа формы тока и напряжения микроплазменного процесса при импульсном энергетическом воздействии в растворах, обеспечивающих контроль качества покрытий металлических изделий на стадии их формирования.

Основными задачами диссертационной работы в связи с поставленной целью являются:

1. Анализ существующих методов энергетического воздействия для нанесения покрытий в растворах, выявление электрических параметров процессов и диапазонов их изменений для адекватной оценки формируемого покрытия и получения информации о состоянии процесса микроплазменного оксидирования с целью управления качеством формируемого покрытия требуемого функционального назначения.
2. Разработка математической модели начальных стадий микроплазменного процесса в терминах электрических величин и доказательство ее адекватности.
3. Разработка методов измерения электрических параметров математической модели начальных стадий микроплазменного процесса и оценивание их точности.
4. Разработка новых технических решений для средств измерений электрических параметров процесса микроплазменного оксидирования в импульсном режиме.
5. Разработка принципов построения и создание системы автоматизированного сбора, анализа и представления данных о микроплазменном процессе.

Методы исследований. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов теории электрических цепей и идентификации систем, теории погрешностей, математической статистики, системного анализа, математического моделирования, дифференциального и интегрального исчисления с использованием уравнений Фика и преобразований Лапласа. При расчетах и моделировании использовались программные пакеты MATLAB, Mathcad, ANSYS, LabVIEW. Экспериментальные исследования проводились в производственных и лабораторных условиях.

Научная новизна.

1. Разработана и исследована математическая модель начальных стадий микроплазменного процесса, учитывающая связь между протекающим через раствор током и напряжением поляризации, и обеспечивающая возможность контролировать качество формирования покрытия путем измерения параметров электрической цепи микроплазменной системы.

2. Предложен метод определения параметров математической модели (сопротивления и емкости границы раздела, сопротивления раствора, индуктивности токоведущих проводов) микроплазменного процесса, основанный на анализе формы энергетического воздействия и отклика на него (защищен патентом РФ № 2284517).
3. Разработан метод идентификации материала подвергаемого оксидированию изделия, позволяющий на основе информации об электрических параметрах микроплазменного процесса адаптировать его к свойствам этого материала (защищен патентом РФ № 2281487).
4. Разработана конечно-элементная модель, конструкция и метод оценки метрологических характеристик коаксиального шунта с улучшенными динамическими характеристиками, предназначенного для измерения мгновенных значений тока микроплазменного процесса (решения защищены патентом РФ № 80585).
5. Предложены структура, принципы построения и практическая реализация измерительной информационной системы, позволяющей в реальном времени измерять характеризующие микроплазменный процесс ток и напряжение в широком динамическом диапазоне с адаптивным высоким разрешением.
6. Предложены технические решения по построению источников импульсных энергетических воздействий с программируемой формой фронта импульса, получившие широкое промышленное внедрение (патент РФ № 2330353, сертификат об утверждении типа средства измерения РФ № 28856-05).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель начальных стадий микроплазменного процесса, полученная на основе линейных цепей, позволяет описывать изменение тока в растворе от поляризационного напряжения на начальных стадиях формирования барьерного слоя, причем параметры модели характеризуют качество покрытия.
2. Метод определения электрических параметров микроплазменного процесса, основанный на анализе формы, как энергетического воздействия, так и отклика на него, позволяет определить параметры эквивалентной схемы электрической цепи микроплазменной системы.
3. Новый метод идентификации материалов, основанный на анализе электрических параметров микроплазменного процесса, обеспечивает возможность его адаптации к свойствам материала.
4. Обоснованная теоретически и экспериментально конструкция коаксиальных шунтов для измерения мгновенных значений тока быстропротекающих микроплазменных процессов с высокими метрологическими характеристиками (погрешность 0,5 % в диапазоне от 100 А до 20 кА при скорости нарастания тока до 10^7 А/с).

5. Измерительная информационная система, структура и ее принципы построения позволяют в реальном времени измерять характеризующие микроплазменный процесс ток и напряжение в широком динамическом диапазоне с адаптивным высоким разрешением (до 50 мВ в диапазоне от 0 до 3 кВ при скорости изменения напряжения до 10^8 В/с).
6. Предложенные технические решения для создания источников импульсных энергетических воздействий напряжением от 100 В до 1000 В с длительностью фронта не менее 10 мкс и регулируемой формой импульса позволяют формировать покрытия с заданными свойствами и оценивать их качество.

Практическая значимость результатов исследований. Результаты проведенных исследований позволяют создавать измерительное оборудование позволяющее изучать кинетику и механизм процессов формирования покрытия в зависимости от режимов локализации энергии высокой плотности, природы и состава фаз. Результаты идентификации микроплазменных процессов в растворах по вольтамперным характеристикам отражены в отчете АВЦП по гранту 2.1.2.5273 и в отчете по научно-исследовательской работе на тему «Исследование возможности разработки высоковольтного высокочастотного измерителя формы сигнала» выполненного по х/д № 1-82/02 для ООО «Техника и технологии электрохимии».

Полученные в работе результаты полезны разработчикам систем контроля и измерения формы токов и напряжения сложной формы в силовых установках различного назначения, например в электроэнергетике, в сварочной технике, в электрохимических технологиях и т.д., в получении интегральных характеристик объекта исследования и принятии эффективных решений управления технологическими процессами.

Результаты работы могут также способствовать созданию и совершенствованию методов и средств метрологического обеспечения систем измерений больших импульсных токов и напряжений и могут использоваться при разработке методик выполнения измерений в испытательных лабораториях силового оборудования, а также в процедурах аккредитации и подтверждения компетенции этих лабораторий.

Реализация результатов работы.

Результаты исследований по теме диссертации использованы при выполнении под руководством и при непосредственном участии автора следующих хозяйственных и госбюджетных НИР:

- Разработка компьютерной системы измерения параметров фронта высоковольтных импульсов по заказу ООО "Техника и технология электрохимии", г. Томск, 2002 г., х/д № 1-82/02.
- Разработка установки «Корунд» по нанесению кальцийфосфатных покрытий, содержащих гидроксипатит, на титановые имплантаты методом микродугового оксидирования по заказу Института физики прочности и материаловедения.

дения СО РАН, г. Томск, 2004 г., контракт 01KR/03/RU с университетом Даджин (Южная Корея).

- Разработка компьютерной системы измерения больших токов по заказу ОАО "Новосибирский завод химконцентратов", г. Новосибирск, 2004-2005 гг., х/д № 1-27/04у.
- Разработка измерительного интегрирующего преобразователя «Квант-2» по заказу Сибирского государственного научно-исследовательского института метрологии, г. Новосибирск, 2006 г.
- Разработка линии нанесения функциональных и декоративных керамических покрытий в рамках программы британо-российского партнерства "Атомные города" по заказу ООО «Русский профиль», г. Красноярск, 2005-2006 гг., х/д № 52.
- Разработка компьютерной системы измерения и управления для малогабаритного бетатрона на энергию до 4 МЭВ по заказу научно-исследовательского института интроскопии, г. Томск, 2005, х/д № 1-166/05у.
- Грант 2.1.2.5273 «Параметрическая идентификация микроплазменных процессов в растворах по вольтамперным характеристикам», АВЦП Рособразования "Развитие научного потенциала высшей школы", 2006-2007 гг.
- Разработка и создание программируемого генератора напряжения по заказу НИИ автоматики и электромеханики, г. Томск, 2007 г., х/д 1-10/07.
- Разработка источника питания для нанесения покрытий методом микроплазменного оксидирования «CORUND M1» по заказу ООО «Сибспарк», г. Томск, 2009 г.
- Разработка линии по нанесению наноструктурных неметаллических неорганических покрытий «Alline-4» в рамках программы ОАО «РОСНАНО» по направлению «Машиностроение и металлообработка» по заказу ООО «МАНЭЛ», 2010-2011 гг., х/д № У03/01-10 и № У06/03-11.
- Изготовление и поставка автоматизированного измерительного комплекса по заказу ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, п. Менделеево, Московская область, 2010 г., х/д 1-76/10у.
- Грант ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на проведение исследований по теме «Прецизионные резистивные и индуктивные преобразователи с улучшенными динамическими характеристиками», 2010-2012 гг., госконтракт 1.387С.2010.
- Грант по постановлению Правительства РФ № 218 на тему «Разработка унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии "система-на-кристалле" для систем управления и электропитания космических аппаратов (КА) связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», направление 3.2 – разработка технологии формирования слоистых наноструктурных неметаллических неорганических покрытий и материалов, пригодных для изготовления функциональных изделий по договору от 7 сентября 2010 г. № 13.G25.31.0017 между ОАО "ИСС" и Минобрнауки России.

Поддержка работ Российским фондом фундаментальных исследований в 2006 г. (РФФИ № 06-08-07073-з).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях: Региональной научно-практической конференции "Радиотехнические и информационные системы и устройства" (Томск, 1994); III-й Международной конференции "Измерения, контроль, автоматизация производственных процессов" (Барнаул, 1994); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Проблемы сертификации и управления качеством" (Красноярск, 1997); Международной научно-практической конференции "Качество-стратегия 21 века" (Томск, 1998, 1999, 2005); 4-ом Корейско-Российском международном симпозиуме по науке и технике "КОРУС 2000" (Томск, 2000); 2-й и 3-й Международных научно-технических конференциях "Измерение, контроль, автоматизация" (Барнаул, 2001, 2002); 7-й и 9-й Международных конференциях по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (Томск, 2004, 2008); IX Международной конференции "Физико-химические процессы в неорганических материалах" (Кемерово, 2004); Международном научно-практическом семинаре "Повышение надежности сварных соединений при монтаже и ремонте технологического оборудования в энергетике" (Киев, Украина, 2005); 51-ом и 52-ом Международных научных коллоквиумах (IWK) "Информационные технологии и электротехника – устройства и системы, материалы и технологии для будущего" (Ильменау, Германия, 2006, 2007); XVIII-ом Всемирном Конгрессе ИМЕКО "Метрология для устойчивого развития" (Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2006); Международных сибирских конференциях IEEE (SIBCON) по управлению и связи (Томск, Россия, 2007, 2009); 9-ом Международном симпозиуме ИМЕКО ТК 14 (ISMQC) "Измерения и контроль качества" (Мадрас, Индия, 2007); 16-ом Международном симпозиуме ИМЕКО ТК 4 "Перспективы развития приборов и методов для электрических и электронных измерений" (Флоренция, Италия, 2008); 17-м симпозиуме ИМЕКО ТК4 "Измерительные приборы эры информационных и коммуникационных технологий" (Кошице, Словакия, 2010).

Разработанный с участием автора информационно-измерительный комплекс для технологических линий нанесения наноструктурных покрытий в номинации «Новые высокотехнологичные разработки оборудования и наукоемкие технологии» удостоен диплома I степени с вручением Золотой медали на XVII международной выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Hi-Tech'2011), проходившей с 15 по 17 марта 2011 г. в г. Санкт-Петербурге.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной точностью расчетных данных с вольт-амперными характеристиками, полученными при проведении экспериментов во время нанесения покрытий при энергетическом воздействии в растворах на изделиях из титана, алюминия и магния. Достоверность научных положений и

выводов также основана на корректном использовании общепризнанных законов и положений электрохимии и электротехники.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 45 печатных работ, из них: 1 монография, 4 патента Российской Федерации и 22 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК для опубликования научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 214 наименований и приложения. Общий объем работы – 302 страницы, включая 109 рисунков и 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе "Микроплазменные процессы формирования покрытий" рассмотрен объект исследования – микроплазменный процесс, приведена его классификация, определены характеристики электрических сигналов энергетического воздействия и дан обзор методов и средств управления качеством формируемого покрытия.

При микроплазменном оксидировании изделие помещается в ванну с электропроводящим раствором, выполняя роль одного из электродов. В качестве другого электрода можно использовать корпус металлической ванны. При подаче напряжения на электроды в цепи последовательно соединенных элементов (рис. 1) протекает электрический ток от источника питания через металлическое изделие (электрод) и электролит. Второй электрод исключается из рассмотрения, так как обладает малым поляризационным сопротивлением и площадью в десятки раз превышающей площадь обрабатываемого изделия. В результате имеем микроплазменную систему, состоящую из источника энергетического воздействия, изделия и электролита.

Прохождение электрического тока вызывает образование оксидов металлов на поверхности изделия-электрода, что приводит к увеличению сопротивления области раздела электрод-раствор. По мере повышения напряжения происходит пробой оксидной пленки, сопровождающийся искрением. При дальнейшем возрастании напряжения интенсивность искрения увеличивается, причем характер разрядов меняется от искрового до дугового. В результате на поверхности формируется наноструктурное неметаллическое покрытие. Основными показателями качества таких покрытий являются их пористость и толщина, которые, в свою очередь, определяют свойства покрытия для конкретного функционального назначения, такие как твердость, механическая и электроизоляционная прочность, теплопроводность, коррозионная стойкость, износостойкость и т.д.



Рис. 1 Микроплазменная система

Известно, что качество покрытия зависит от параметров энергетического воздействия, т.е. амплитуд напряжения и тока в диапазонах от сотен до тысяч вольт и от единиц ампер до десяти килоампер соответственно, а также полярности и формы сигнала воздействия. При стационарных и медленно меняющихся энергетических воздействиях, для оценки качества покрытия обычно измеряют *средние значения* тока и напряжения, которые характеризуют микроплазменный разряд при электрическом пробое сформированного покрытия.

В настоящее время на промышленный уровень выходят методы микроплазменного оксидирования основанные на быстромеменяющемся (импульсном) энергетическом воздействии, где скорость изменения напряжения достигает значений 10^8 В/с, а плотность тока – 600 А/дм². К таким методам относится метод обработки поверхности изделия импульсным напряжением квазипрямоугольной формы. Данный метод позволяет наносить функциональные покрытия с меньшими энергетическими затратами, но при этом в области раздела двух сред одновременно присутствуют химические, электрохимические, плазменные и термические процессы, что затрудняет анализ и контроль качества покрытия.

В результате изучения состояния проблемы формирования покрытий на металлические изделия методом микроплазменного оксидирования при воздействии импульсным напряжением получены следующие выводы:

1. В отличие от медленно меняющихся энергетических воздействий, энергия импульсного воздействия на область раздела металл-электролит может достигать значений на уровне энергий образования веществ. Это приводит к возникновению новых химических и физических реакций, как в теле вещества, так и в области раздела, что обеспечивает возможности создания качественно новых покрытий. Следовательно, импульсный режим микроплазменных процессов является перспективным, и необходимо для его широкого

применения разрабатывать методы и средства, обеспечивающие контроль качества покрытий металлических изделий на стадии их формирования.

2. Традиционно качество покрытия оценивается на основе средних, действующих и амплитудных значений тока и напряжения микроплазменного процесса, что является обоснованным и приемлемым для стационарных и медленно меняющихся энергетических воздействий. Однако в импульсном режиме микроплазменного процесса формирование покрытия сопровождается изменением формы электрического тока. Тогда обработка мгновенных значений тока и напряжения может обеспечить получение дополнительной информации о качестве формируемого покрытия. При этом необходимо решать проблему рациональной дискретизации сигналов по времени и по амплитуде.
3. Анализ быстропротекающих процессов устанавливает следующие требования к средствам измерений тока и напряжения: они должны работать в широком диапазоне амплитуд и частот с адаптивным разрешением, позволяющим детально рассматривать малые изменения сигнала в присутствии больших постоянных составляющих.
4. Существует необходимость разработки математической модели, позволяющей в терминах электрических величин адекватно характеризовать качество покрытия. Из-за отсутствия такой модели при формировании покрытия требуемого функционального назначения обычно стараются обеспечить нахождение электрических параметров в определенных границах, значения которых получают экспериментально во время отработки технологии. Для оперативной подстройки технологического процесса и снижения затрат при "конструировании" новых неметаллических, неорганических покрытий требуются более совершенные экспресс-методы контроля их качества непосредственно в процессе их формирования.
5. Свойства покрытий, получаемых при микроплазменном оксидировании, зависят от многих факторов: типа электролита, материала и геометрических размеров обрабатываемого изделия, свойств источников энергетического воздействия, технологических режимов. Необходимо разработать учитывающие эти сложности принципы создания системы автоматизированного сбора, анализа и представления данных о микроплазменном процессе.

Во **второй главе** " Математическое моделирование процесса формирования покрытий при импульсном энергетическом воздействии" описана математическая модель в терминах электрических величин для контроля качества покрытий в процессе их формирования, а также приводятся результаты ее исследования.

Разработка модели.

При подаче импульсного напряжения микроплазменные разряды возникают не сразу, а по истечении 20 мкс. Поэтому можно предположить, что в начальный период энергетического воздействия, когда формируется барьерный слой, на поверхности изделия идут только электрохимические реакции. Следовательно, начальная стадия микроплазменного процесса может быть описана

электрохимической моделью. В основу этой модели положена эквивалентная цепь электрохимической ячейки с одним поляризующим электродом при условии, что вспомогательный электрод (противоэлектрод) не поляризуется. Для анализа начальной стадии микроплазменного процесса предложена эквивалентная электрическая схема (рис. 2), которая включает в себя параллельное соединение активного сопротивления R_{Γ} и емкости C_{Γ} границы металл-раствор, сопротивление раствора R_p и индуктивность подводящих проводов источника энергетического воздействия $L_{и}$. Индуктивность $L_{и}$ играет в модели существенную роль, вследствие высокой скорости нарастания фронта импульсного воздействия.

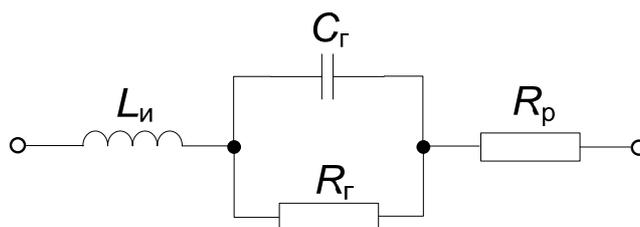


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема начальной стадии микроплазменного процесса

Исходя из предложенной модели, поведение цепи будет определяться свойствами поляризующего изделия-электрода. Изменение толщины и пористости покрытия можно характеризовать электрическими параметрами эквивалентной схемы, а именно эквивалентным сопротивлением R_{Γ} и емкостью C_{Γ} границы металл-раствор. Вследствие этого энергетическое воздействие становится инструментом оценивания качества покрытия в процессе его нанесения и используется как стимулирующий сигнал для измерения параметров эквивалентной схемы.

В работе проведен анализ (операторным методом) реакции предложенной модели на воздействие прямоугольной (для двух случаев при $L_{и} = 0$ и при $L_{и} \neq 0$) и трапециевидной формы при $L_{и} = 0$. Ниже приведены результаты этого анализа.

Прямоугольное воздействие, $L_{и} = 0$. При этом воздействии с амплитудой U [В] ток (рис. 3), протекающий в микроплазменной системе определяется формулой:

$$I(t) = \frac{U}{(R_p + R_{\Gamma})} \left(\frac{R_{\Gamma}}{R_p} e^{-\frac{t}{\tau_m}} + 1 \right), \quad \tau_m = \frac{R_{\Gamma} R_p C_{\Gamma}}{(R_{\Gamma} + R_p)}. \quad (1)$$

В этом случае параметры эквивалентной схемы имеют следующий вид:

$$R_p = \frac{U}{I(t_1)}, \quad R_{\Gamma} = \frac{U}{I(t_2)} - \frac{U}{I(t_1)}, \quad C_{\Gamma} = \frac{t_x}{\ln 2 \left(\frac{R_{\Gamma} R_p}{R_{\Gamma} + R_p} \right)}, \quad \text{если } I(t_x) = \frac{I(t_1) + I(t_2)}{2} \quad (2)$$

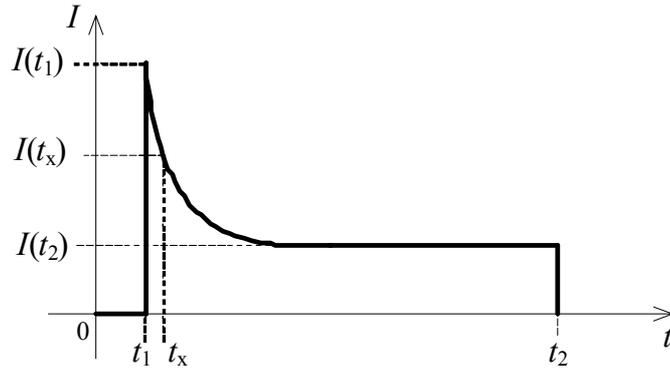


Рис. 3. Ток в микроплазменной системе при прямоугольном воздействии, $L_{\text{и}} = 0$

Трапецевидное воздействие, $L_{\text{и}} = 0$. При этом воздействии со скоростью изменения напряжения ρ [В/с] зависимость изменения тока (рис. 4) будет определяться формулами:

$$\begin{aligned}
 I(t_1) &= \frac{\rho t_1}{(R_p + R_r)} + \frac{\rho R_r^2 C_r}{(R_p + R_r)^2} - \frac{\rho R_r^2 C_r}{(R_p + R_r)^2} e^{-\frac{t_1}{\tau_m}}, \\
 I(t_x) &= \frac{\rho t_1}{(R_p + R_r)} + \frac{\rho R_r^2 C_r}{(R_p + R_r)^2} e^{-\frac{(t_x - t_1)}{\tau_m}} - \frac{\rho R_r^2 C_r}{(R_p + R_r)^2} e^{-\frac{t_x}{\tau_m}}, \\
 I(t_2) &= \frac{\rho t_1}{(R_p + R_r)}, \quad C_r = \frac{(t_x - t_1)}{\ln 2 \left(\frac{R_r R_p}{R_r + R_p} \right)}, \quad \text{если } I(t_x) = \frac{I(t_1) + I(t_2)}{2}.
 \end{aligned} \quad (3)$$

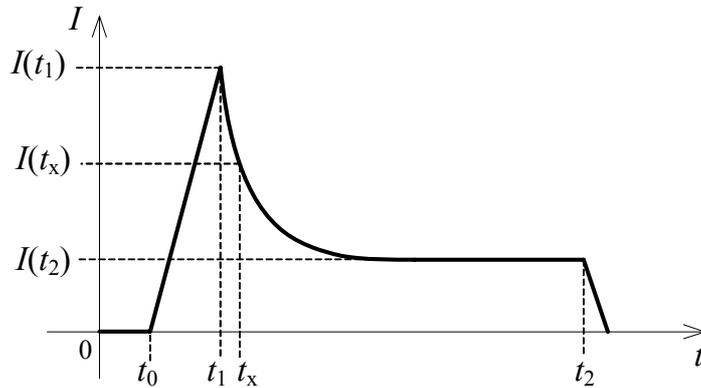


Рис. 4. Ток в микроплазменной системе при трапецидальном воздействии, $L_{\text{и}} = 0$

Прямоугольное воздействие, $L_{\text{и}} \neq 0$. Реакция системы имеет вид:

$$I(t) = \frac{U}{(R_r + R_p)} \left(\frac{p_1 p_2 C_r R_r}{(p_2 - p_1)} (e^{p_2 t} - e^{p_1 t}) + \frac{p_1}{(p_2 - p_1)} e^{p_2 t} - \frac{p_2}{(p_2 - p_1)} e^{p_1 t} + 1 \right), \quad (4)$$

$$\text{где } p_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2a}, \quad a = L_{\text{и}}, \quad b = \left(\frac{L_{\text{и}}}{C_r R_r} + R_p \right), \quad c = \left(1 + \frac{R_p}{R_r} \right) \frac{1}{C_r}.$$

Измерив значения I_{\max} , $I_{\text{const}} = \frac{U}{R_{\Gamma} + R_p}$ и $t_{\max} = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \left(\frac{C_{\Gamma} R_{\Gamma} p_2 + 1}{C_{\Gamma} R_{\Gamma} p_1 + 1} \right)$ можно определить C_{Γ} , R_{Γ} , R_p (рис. 5).

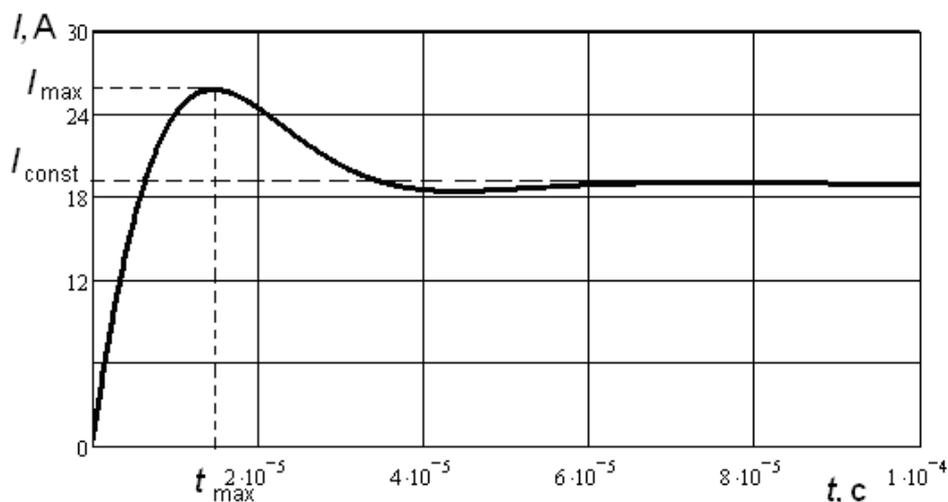


Рис. 5. Изменение тока микроплазменной системы при прямоугольном воздействии и наличии индуктивности токоподводящих проводов

Для доказательства адекватности предлагаемой модели проведены эксперименты по получению покрытий на металлических изделиях алюминиевых сплавов 2021, 7071, АМг, представляющие собой прямоугольные пластины площадью 10×25 мм и толщиной 2 мм в 4-х компонентном электролите следующего состава: $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 12\text{H}_2\text{O}$ – 40 г/л; $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$ – 30 г/л; H_3BO_3 – 20 г/л; NaF – 10 г/л.

Путем измерения мгновенных значений тока и напряжений в цепи микроплазменной системы были построены осциллограммы тока и определены значения параметров эквивалентной схемы, которые использовались в дальнейшем для имитационного моделирования в среде MATLAB (табл. 1).

Таблица 1

Экспериментальные данные при $U = 250$ В, $L_{\text{и}} = 43$ мкГн, $R_{\text{и}} = 1,3$ Ом, $R_p = 5$ Ом.

Время процесса, с	I_{\max} , А	t_{\max} , с	I_{const} , А	R_{Γ} , Ом	C_{Γ} , мкФ
120	24	0,7	18,4	7,2	1,2
180	20,2	0,8	15,1	10,5	0,6
240	18,2	0,8	13,5	12,4	0,4
300	14,4	0,9	11,7	15,3	0,2

При моделировании (рис. 6), в качестве источника энергетического воздействия был использован источник постоянного напряжения, коммутируемый прерывателем. В качестве параметров выходного комплексного сопротивления моделируемого источника взяты параметры реального источника.

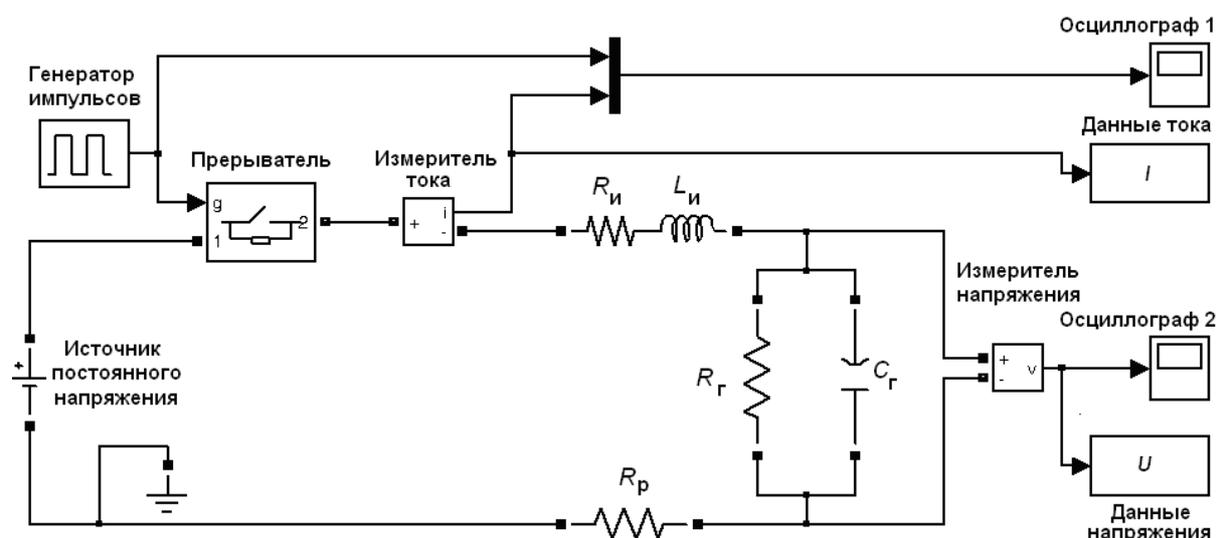


Рис. 6. Компьютерная модель в системе MATLAB

Погрешность модели с учетом совокупности n погрешностей мгновенных значений тока микроплазменной системы для каждого i -го импульса, полученного при разных значениях времени процесса, оценивалась по норме вектора

$$\vec{\delta}_{ij} = (\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{in}, \delta_{21}, \delta_{22}, \dots, \delta_{2n}, \delta_{k1}, \delta_{k2}, \dots, \delta_{kn}),$$

равной $\delta = \max |\delta_{ij}|$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ и $i = 1, 2, 3, \dots, k$.

$$\delta_{ij} = \frac{I_{Mij} - I_{\Delta ij}}{I_{\Delta ij}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где I_{Mij} , $I_{\Delta ij}$ – значения тока, определенные при проведении эксперимента и компьютерным моделированием, n – количество мгновенных значений при дискретизации импульса k – количество импульсов.

Результаты моделирования и экспериментов по нанесению покрытий показали, что погрешность модели начальных стадий микроплазменного процесса не превышает 3% (рис. 7).

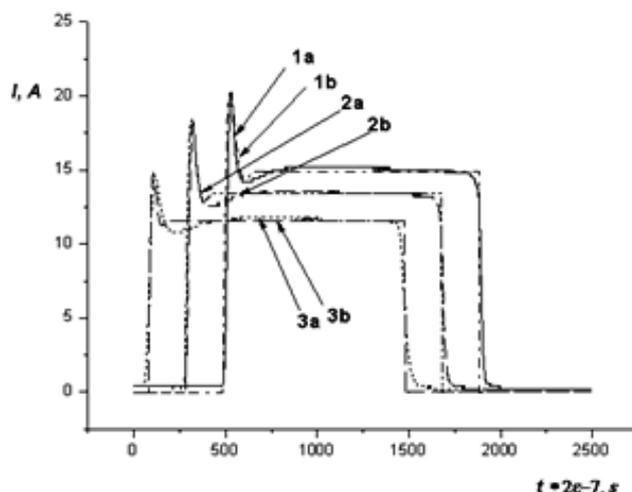


Рис. 7. Сравнение данных тока микроплазменной системы полученных в результате моделирования и эксперимента: 1а, 1б – 3 мин; 2а, 2б – 4 мин; 3а, 3б – 5 мин; где а – данные модели; б – данные эксперимента

Совпадение данных моделирования и эксперимента подтверждают адекватность эквивалентной схемы процесса для импульсных воздействий, что, в свою очередь, служит обоснованием возможности контроля параметров микроплазменного покрытия по вариациям активного сопротивления R_T и емкости C_T границы металл-раствор.

В работе представлены (табл. 2) экспериментальные данные качества покрытия (толщины и пористости) и эквивалентные сопротивления и емкости границы металл-раствор, рассчитанные по измеренным мгновенным значениям тока и напряжения микроплазменной системы, для разных длительностей процесса на алюминиевом сплаве 2021.

Таблица 2

Связь параметров модели с толщиной и пористостью

Время обработки, с	R_T , Ом	C_T , мкФ	Толщина покрытия h , мкм	Пористость P , %	Количество пор на 1см^2 покрытия	Средний диаметр пор, мкм
60	9,7	1,40	4,16	0,92	$3,3 \times 10^7$	0,16
180	8,5	1,6	8,16	4,70	$6,3 \times 10^6$	1,17
300	10,8	1,26	9,13	4,11	3×10^7	0,50
600	9,6	1,43	11,33	16,89	$8,5 \times 10^6$	1,00
900	13,8	1,16	17,66	4,67	$3,6 \times 10^6$	1,67

На рис. 8 приведены микрофотографии покрытий образцов на сплаве алюминия 2021 при различных длительностях процесса (при увеличении в 2500 и 1000 раз для каждой длительности).

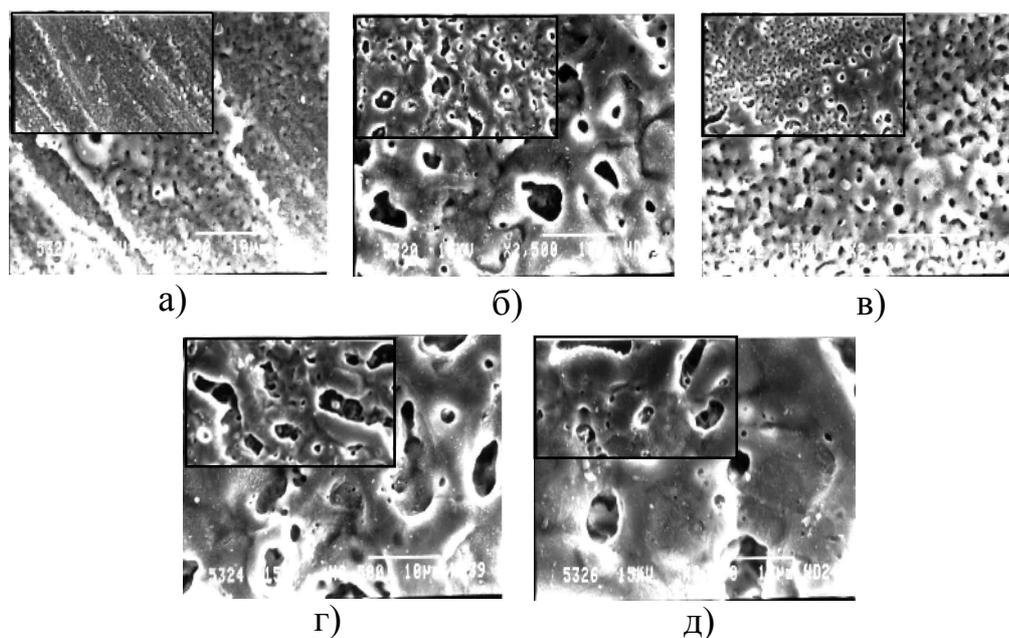


Рис. 8. Микрофотографии покрытий образцов на сплаве алюминия 2021 при различных длительностях процесса, мин: а) 1; б) 3; в) 5; г) 10; д) 15

Из рис. 8 видно, что на первых минутах покрытие начинает образовываться, а на третьей минуте оно становится тонким и пористым. С увеличением времени обработки поры начинают зарастать, наряду с появлением других пор, и к пятой минуте процесса получается равномерное мелкопористое покрытие. С дальнейшим увеличением времени (более 10 минут) обработки происходит пробой уже сформированного покрытия с образованием пор большего диаметра. При обработке в течение 15 минут образованные пробоем поры частично зарастают, диаметр пор уменьшается.

Таким образом, электрические параметры микроплазменной системы являются отображением толщины и пористости получаемого покрытия:

$$R_r = k_1 h/P, \quad (6)$$

$$C_r = k_2 P/h, \quad (7)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности, зависящие от состава электролита, P – пористость покрытия, h – толщина покрытия.

Задача определения рациональной частоты дискретизации и числа уровней квантования.

Поскольку определение параметров R_r и C_r выполняется на основе обработки мгновенных значений тока и напряжения, потребовалось решить задачу определения рациональной частоты дискретизации f_d и числа N уровней квантования измеряемых электрических сигналов. Целевой функцией при этом является минимизация погрешности вычисления параметров относительно пределов погрешностей δR_r^{pp} , δC_r^{pp} , δR_p :

$$\begin{cases} \max(f_d(R_r), f_d(C_r), f_d(R_p)) \\ \max(N(R_r), N(C_r), N(R_p)) \end{cases} \text{ при } \delta R_r \leq \delta R_r^{pp}, \delta C_r \leq \delta C_r^{pp}, \delta R_p \leq \delta R_p^{pp} \quad (8)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 9, из которых следует, что на инструментальную погрешность в большей степени влияет частота дискретизации. Так, например, для обеспечения погрешности 3% частота должна быть не менее 10 МГц.

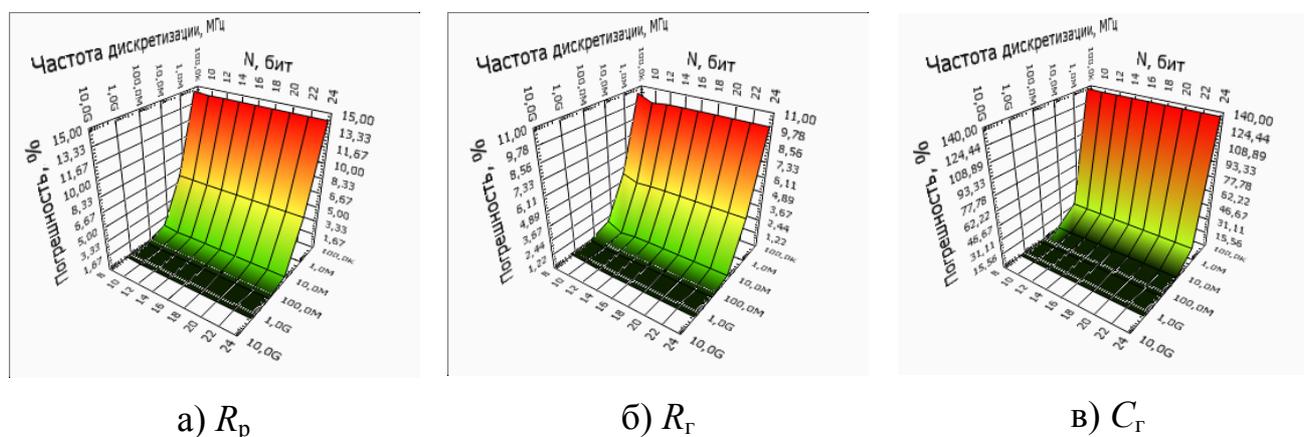


Рис. 9. Связь инструментальной погрешности определения параметров R_p , R_r и C_r эквивалентной схемы с характеристиками квантования по времени и по уровню

Метод измерения параметров модели.

В работе показано, что при использовании трапециевидного энергетического воздействия можно выделить активную и емкостную составляющие тока микроплазменной системы $I = I_A + I_C$ в процессе нанесения покрытия и на основе этих данных определить параметры, характеризующие качество покрытия:

$$C_r = I_C / (dU_{\text{п}}/dt), \quad (9)$$

$$R_r = \frac{U_{\text{п}}}{I_A}, \quad (10)$$

где $U_{\text{п}}$ – поляризационное напряжение, измеряемое между изделием и измерительным электродом (см. рис. 1), размещенным в непосредственной близости от границы раздела.

По мгновенным значениям тока микроплазменной системы и поляризационного напряжения строится вольтамперная характеристика (ВАХ) при возрастающем (рис. 10, кривая 1а) и убывающем (рис. 10, кривая 1б) энергетическом воздействии.

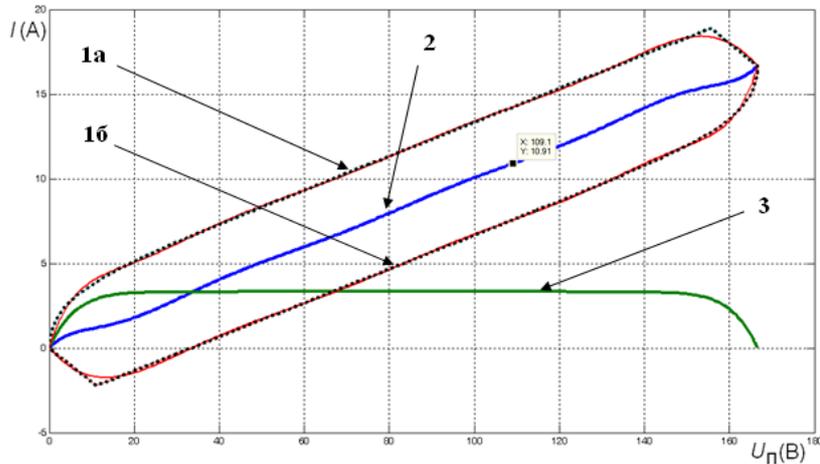


Рис. 10. Графическая иллюстрация сущности метода измерения параметров модели: кривые 1а,1б показывают зависимость тока микроплазменной системы от поляризационного напряжения (ВАХ); кривая 2 соответствует активной составляющей ВАХ; кривая 3 – реактивной составляющей

Токи на восходящей и нисходящей ветвях ВАХ определяются соотношениями:

$$\vec{I}_{\Sigma} = \vec{I}_A + C_r \cdot d\vec{U}_{\text{п}}/dt, \quad (11)$$

$$\vec{I}_{\Sigma} = \vec{I}_A + C_r \cdot d\vec{U}_{\text{п}}/dt \quad (12)$$

Величины $d\vec{U}_{\text{п}}/dt$ и $d\vec{U}_{\text{п}}/dt$ одинаковы при симметричном трапециевидном импульсе поляризационного напряжения, но имеют разные знаки $d\vec{U}_{\text{п}}/dt = -d\vec{U}_{\text{п}}/dt$. Алгебраическое сложение ВАХ (11) и (12) позволяет получить выражение для активного тока I_A (рис.10, кривая 2):

$$\vec{I}_{\Sigma} + \vec{I}_{\Sigma} = 2I_A, \quad (13)$$

а их алгебраическое вычитание дает выражение для емкостного тока I_C :

$$\vec{I}_{\Sigma} - \vec{I}_{\Sigma} = 2 \cdot C_r \cdot dU_{\text{п}}/dt = 2I_C. \quad (14)$$

Необходимо заметить, что использование поляризационного напряжения в ВАХ позволяет исключить влияние свойств электролита на результат измерения.

Третья глава “Разработка и исследование преобразователей для измерения больших импульсных токов” посвящена выбору первичного преобразователя тока, протекающего в цепи микроплазменной системы.

Основные требования, предъявляемые к таким преобразователям, определяются спецификой исследуемого процесса. А именно: динамическим диапазоном (от сотен ампер до десятков килоампер) и высокой скоростью нарастания тока (10^7 А/с), а также наличием электромагнитных помех микроплазменных разрядов.

Для оценки требований к частотным характеристикам преобразователей был рассмотрен спектр отклика на типовое импульсное воздействие с длительностью 200 мкс, длительностью фронта 10 мкс и скважностью 100. Результаты гармонического анализа отклика показали, что полоса пропускания преобразователей ток-напряжение должна составлять не менее 100 кГц.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований широко используемых датчиков переменного тока (трансформаторов тока и их разновидности – катушки Роговского, датчиков Холла, магнитооптических датчиков, магниторезистивных датчиков и резистивных датчиков) был сделан выбор в пользу резистивных шунтов для измерения больших импульсных токов микроплазменной системы, благодаря малой стоимости, линейности, высоким метрологическим характеристикам, помехозащищенности и сравнительной простоте изготовления.

Эквивалентная схема шунта содержит активное сопротивление R , паразитные индуктивность L и емкость C , а полное сопротивление можно представить в виде:

$$Z = R \left[1 + j\omega \left(\frac{L}{R} - RC \right) \right]. \quad (15)$$

Так как типичное значение R составляет менее 0,1 Ом, влияние паразитной емкости пренебрежимо мало вплоть до высоких частот. Для уменьшения реактивной составляющей погрешности шунта предпочтительнее использовать шунты бифилярной конструкции и, в частности, коаксиальной конструкции. Магнитное поле в таких преобразователях сосредоточено в зазоре между цилиндрами, а внутри и снаружи цилиндров, образующих резистивную часть коаксиального шунта, поле, создаваемое протекающим током, отсутствует и влияние электромагнитного поля микроплазменных разрядов минимизируется. При этом существенным фактором, ограничивающим частотный диапазон, становится поверхностный (скин-) эффект. В этом случае передаточная характеристика для скачка тока амплитудой I_0 имеет вид:

$$V(t) \approx I_0 R_0 (1 - e^{-6t/\mu\sigma\Delta^2}), \quad (16)$$

где $I_0 R_0$ – напряжение на выходе "идеального" шунта, Δ – толщина стенки резистивной части шунта, σ – электрическая проводимость токовой цепи, μ – магнитная проницаемость резистивного материала.

На рис. 11. изображена предложенная конструкция коаксиального шунта, состоящая из двух трубок, по которым протекает ток в противоположных направлениях, где 1 – токовые выводы; 2 – потенциальные выводы; 3 – цилиндр из манганина; 4 – медный цилиндр.

Для расчета конструктивных и электрических параметров коаксиального шунта для измерения импульсных токов в графической среде LabVIEW была разработана программа, позволяющая автоматизировать инженерные вычисления параметров шунтов применительно к конкретной измерительной задаче с целью оценки и выбора возможных вариантов конструкции.

Для учета краевых эффектов была построена модель разработанной конструкции шунта с использованием метода конечных элементов в программном пакете ANSYS (рис. 12). Данная модель позволила оценить магнитное поле конкретной конструкции и получить индуктивность разработанного шунта с учетом токоподводящих и измерительных элементов конструкции. Расчет индуктивности при геометрических размерах шунта $l = 140$ мм (длина шунта), $r_3 = 45$ мм (внешний радиус внутреннего цилиндра), $r_2 = 47$ мм (внутренний радиус внешнего цилиндра) с помощью приближенной формулы было получено значение $1,16 \cdot 10^{-9}$ Гн, а с помощью конечно-элементной модели $10,41 \cdot 10^{-9}$ Гн.

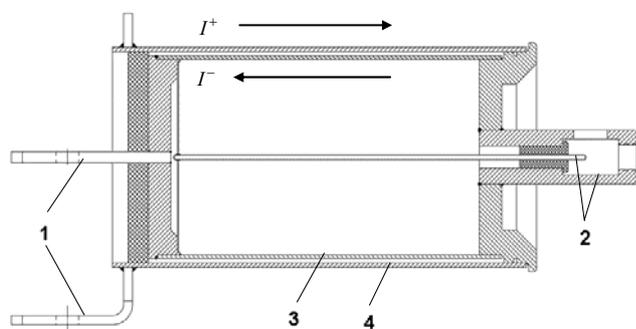


Рис. 11. Конструкция коаксиального шунта

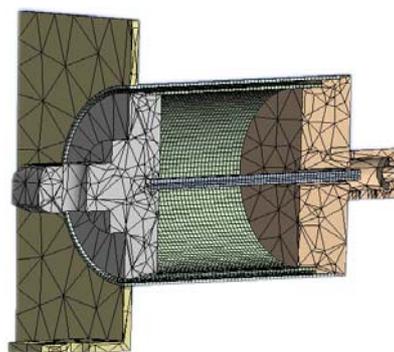


Рис. 12. Модель шунта с использованием метода конечных элементов

На основе коаксиального шунта было разработано устройство (рис. 13) для измерения больших токов, которое введено в реестр средств измерений РФ и имеет следующие характеристики: диапазон измерений мгновенного значения амплитуды импульсного тока $100 \dots 20\,000$ А; пределы допустимой основной погрешности измерения тока $\pm 5\%$, диапазон измерений длительности импульса $1 \dots 100$ мс; длительность фронта импульса 10 мкс.

Для шунтов с малым значением сопротивления порядка мкОм, используемых для измерения больших токов, разработан новый метод поверки (калибровки), позволяющий производить поверку шунтов методом вольтметра-

амперметра с коррекцией погрешностей измерительных каналов по току и напряжению на основе обратного преобразования. Метод позволяет определить относительную погрешность измерения активного сопротивления шунта по формуле:

$$\gamma_c = \frac{\frac{\gamma_1^v \gamma^v}{(1+\gamma^v)^2 - \gamma_1^v \gamma^v} + \frac{\gamma_1^a \gamma^a}{(1+\gamma^a)^2 - \gamma_1^a \gamma^a}}{1 + \frac{\gamma_1^a \gamma^a}{(1+\gamma^a)^2 - \gamma_1^a \gamma^a}}, \quad \gamma^v = \gamma_1^v + \gamma_2^v, \quad \gamma^a = \gamma_1^a + \gamma_2^a \quad (17)$$

где γ_1^v – аддитивная погрешность измерения напряжения; γ_2^v – мультипликативная погрешность измерения напряжения; γ_1^a – аддитивная погрешность измерения тока; γ_2^a – мультипликативная погрешность измерения тока. На устройство для поверки получен патент РФ.

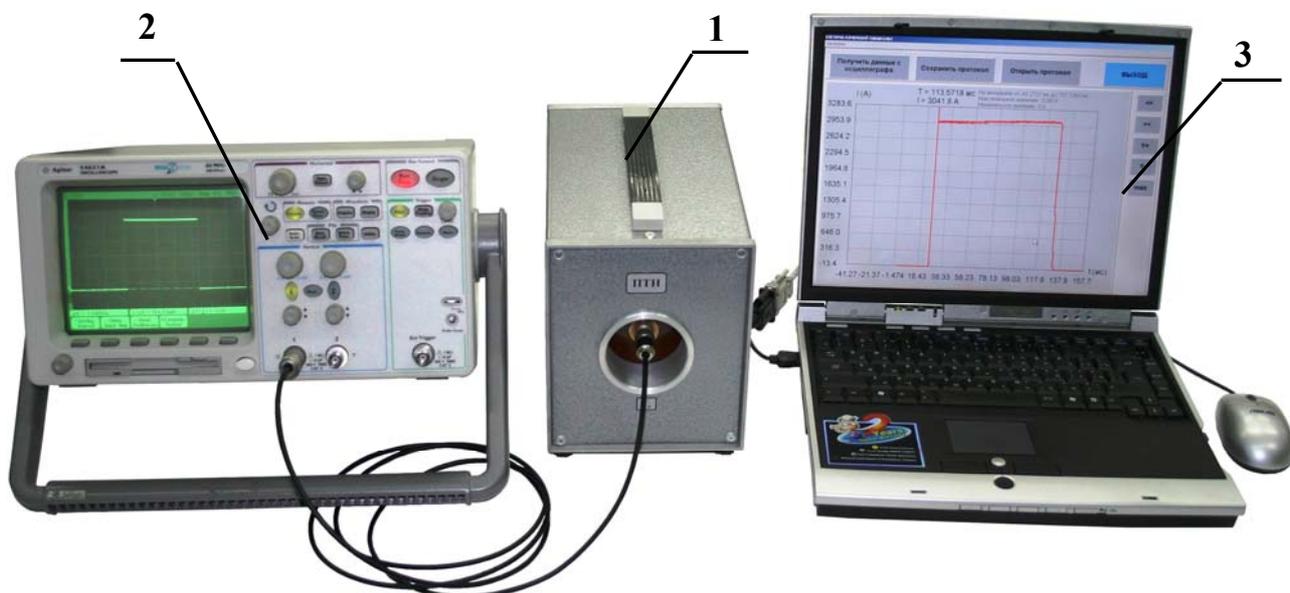


Рис. 13. Общий вид системы для измерения больших токов:
1 – шунт, 2 – осциллограф, 3 – компьютер

В четвертой главе “Разработка и исследование средств измерений высокого напряжения” приведены результаты проектирования устройств для исследования процессов при энергетическом импульсном воздействии на границу металл-раствор.

На рис. 14 представлена предложенная схема измерений электрических параметров микроплазменной системы. Источник энергетического воздействия (ИЭВ) формирует импульс трапециевидной формы с амплитудой от 0 до 3 кВ, частотой от 0 до 10 кГц и диапазоном изменения длительности импульсов 10 мкс - 2000 мкс. Импульсы напряжения подаются на образец, находящийся в токопроводящей ванне с электролитом. Компьютерная система измеряет мгновенные значения тока микроплазменной системы I , напряжения U с выхода ИЭВ и снимаемого с электрода сравнения поляризационного напряжения $U_{\text{п}}$.

Поляризационное напряжение проходит через каналы измерения с грубым и высоким ($U_{п}^*$) разрешениями.

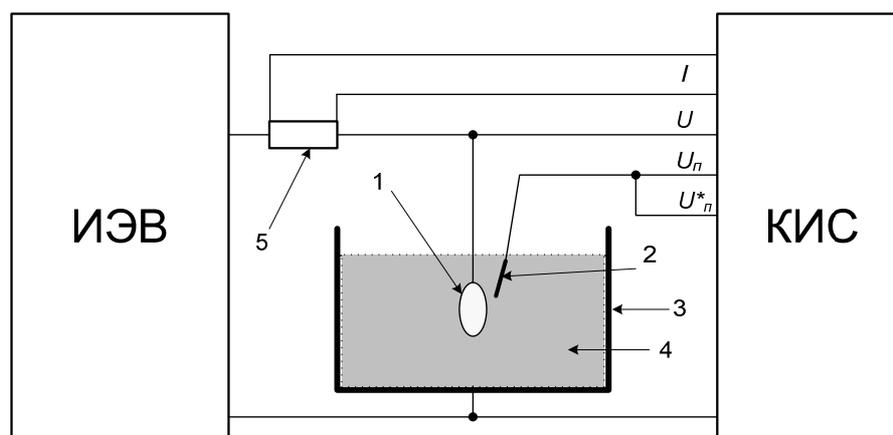


Рис. 14. Блок схема проведения измерений с использованием компьютерной системы: ИЭВ – источник энергетического воздействия, КИС – компьютерная измерительная система, 1 – изделие (электрод), 2 – измерительный электрод, 3 – ванна (противоэлектрод), 4 – раствор электролита, 5 – шунт

Мгновенные значения параметров I , U , $U_{п}$, $U_{п}^*$ микроплазменной системы необходимы и достаточны для определения активной и емкостной составляющих тока, корректно описывающих микроплазменный процесс нанесения керамических покрытий в электролитах. Для реализации измерения сигнала с высоким разрешением в КИС используется устройство повышения разрешения измерительного канала (УПР), принцип действия которого базируется на выделении для исследования части сигнала микроплазменного процесса (рис. 15).

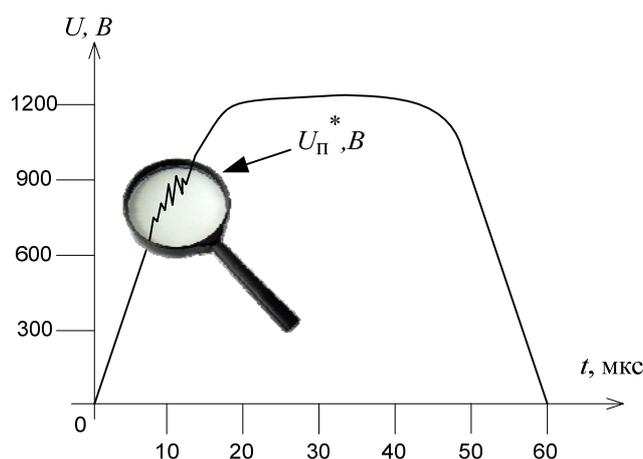


Рис 15. Иллюстрация принципа исследования высокого напряжения

Входной высоковольтный сигнал $U_{п}^*$ претерпевает ряд преобразований. Вначале он уменьшается до уровня, согласованного с входным диапазоном УПР, исследуемый участок сигнала сдвигается к нулевому уровню напряжения, и затем усиливается для согласования его с входным диапазоном аналого-цифрового преобразователя (рис. 16).

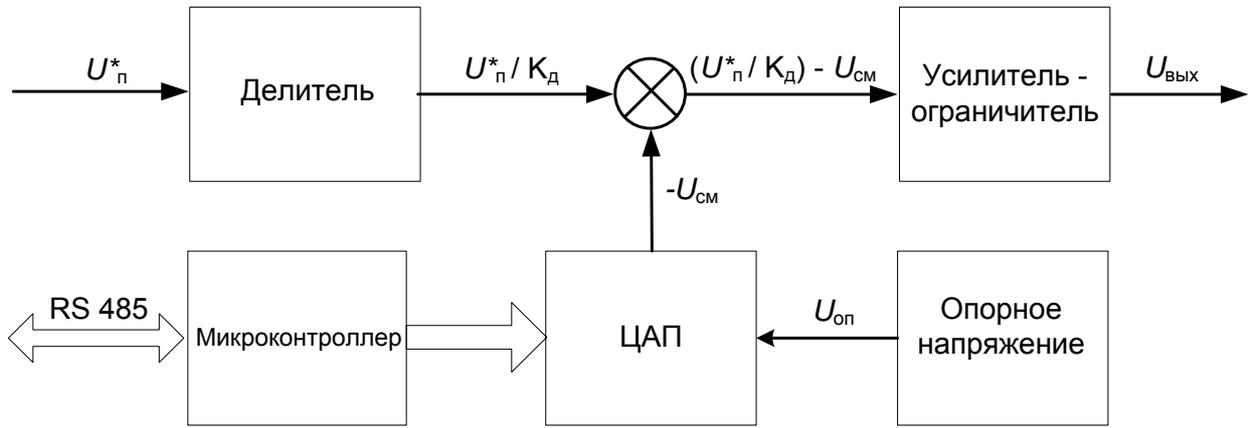


Рис. 16. Структура устройства повышения разрешения измерительного канала

Для предотвращения перегрузки по входу аналого-цифрового преобразователя в качестве усилителя используется усилитель-ограничитель.

Расчеты и экспериментальные исследования данного метода доказали возможность просматривать высоковольтный сигнал до 3 кВ с дискретностью 50 мВ при использовании цифрового осциллографа с 8-разрядным разрешением (рис.17, рис.18).

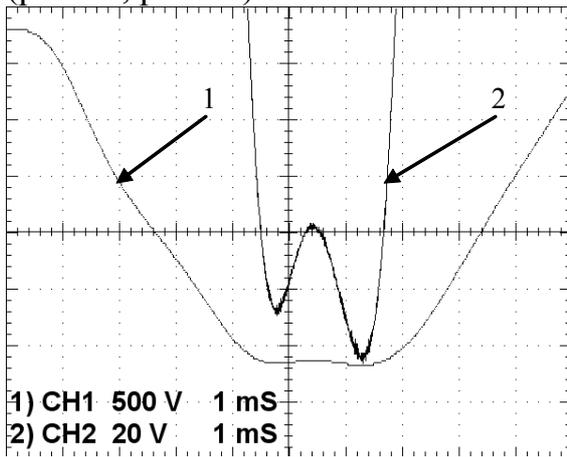


Рис 17. Исходный сигнал (1) и часть исходного сигнала, просматриваемая с большим разрешением с помощью УПР (2)

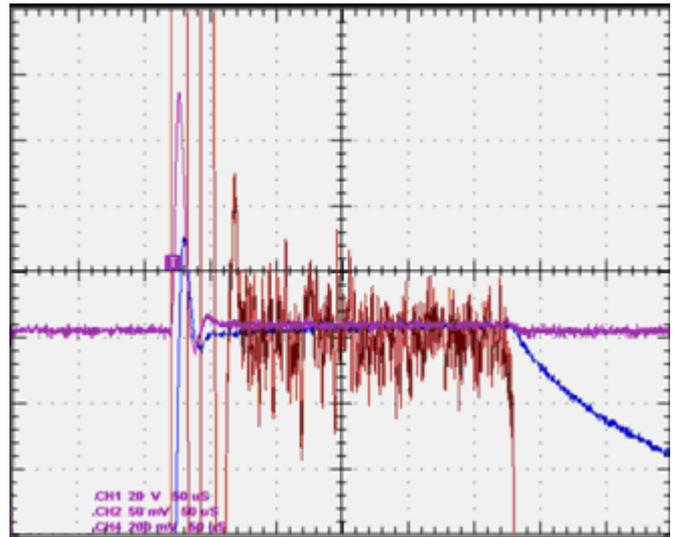


Рис.18. Измерение сигнала с высоким разрешением

Показано, что при использовании в УПР вычитающего усилителя и 16-разрядного ЦАП, формирующего напряжение смещения, погрешность УПР по уровню $\delta_{сдв}$ не превышает 0,1% и определяется по формуле:

$$\delta_{сдв} = \left[\frac{1}{2} (\delta_{цап,1}^2 + \delta_{цап,2}^2 + \delta_{цап,3}^2 + \delta_{цап,4}^2 + \delta_{дел}^2) + \delta_{ну,1}^2 + \delta_{ну,2}^2 \right]^{0,5}, \quad (18)$$

где $\delta_{цап,1}$ – погрешность от интегральной нелинейности ЦАП, $\delta_{цап,2}$ – от дифференциальной нелинейности ЦАП, $\delta_{цап,3}$ – от усиления, $\delta_{цап,4}$ – смещения нуля, $\delta_{дел}$ – масштабного преобразователя сигнала сдвига по уровню, $\delta_{ну,1}$ – усиления нормирующего усилителя, $\delta_{ну,2}$ – смещения нуля нормирующего усилителя.

Пятая глава “Системы контроля и управления микроплазменными процессами” посвящена описанию принципов проектирования измерительных информационных систем (ИИС) для исследования, контроля и управления процессом формирования микроплазменных покрытий.

Разработана концепция автоматизации процесса получения покрытий. В ней выделяется четыре подсистемы контроля электрических параметров: процесса, источника питания, раствора электролита, вспомогательного оборудования.

Формирование множества измеряемых электрических параметров процесса позволяет ввести обратную связь для подсистем управления, использовать их для диагностики природы сплавов обрабатываемого изделия, для прогнозирования и конструирования качества покрытий и, в конечном итоге, изменения режимов технологического процесса.

Решение задачи осуществляется на основе многоуровневой архитектуры клиент-сервер с использованием модульного подхода и технологии виртуальных приборов. Применение модульного подхода заключается в построении аппаратных и программных устройств из более мелких унифицированных модулей.

Для измерения электрических параметров процесса нанесения покрытий при импульсном энергетическом воздействии в растворах используется измерительная информационная система, которая выполняет следующие задачи:

- сбор данных о форме импульсных сигналов тока и напряжения микроплазменной системы через заданные интервалы времени;
- первичная обработка сигналов микроплазменного процесса и их визуализация;
- построение ВАХ по мгновенным значениям импульсных сигналов тока и напряжения в процессе проведения измерения;
- построение ВАХ в трехмерных координатах "ток-напряжение-время";
- построение зависимостей тока и напряжения от времени для различных продолжительностей процесса нанесения покрытия;
- постобработка сигналов микроплазменного процесса для последующего детального анализа.

Разработанная система реализована на базе компьютера, комплекта коаксиальных шунтов для преобразования тока в напряжение, устройства для повышения разрешения измерительного канала и многоканального цифрового осциллографа GDS-71062A (частота дискретизации сигнала 1 ГГц; диапазон измерения тока 0,05 А...20000 А; диапазон измерения напряжений 0...1000 В). Программное обеспечение написано в среде графического программирования LabVIEW. В его состав входят следующие модули:

- расширенная виртуальная панель осциллографа;
- конвертор вольтамперных характеристик;
- 3D визуализатор вольтамперных характеристик;
- анализатор электрических параметров микроплазменного процесса.

На рис. 19 представлен интерфейс с пользователем программного модуля "3D визуализатор вольтамперных характеристик", который выводит в двумерном и трехмерном представлении полученные в различные времена от начала процесса осциллограммы импульсов тока и поляризионного напряжения, а также семейства ВАХ, построенные на основе этих данных.

Реализованная в составе программного обеспечения постобработка позволяет определить:

- скорости изменения тока dI/dt и напряжения dU/dt для импульсных сигналов;
- изменение интегральных характеристик импульсных сигналов тока $\int I(t)dt$ и напряжения $\int U(t)dt$ в течение процесса нанесения микроплазменного покрытия;
- активную или емкостную составляющие ВАХ микроплазменного процесса;
- изменение сопротивления границы раздела в процессе нанесения покрытия;

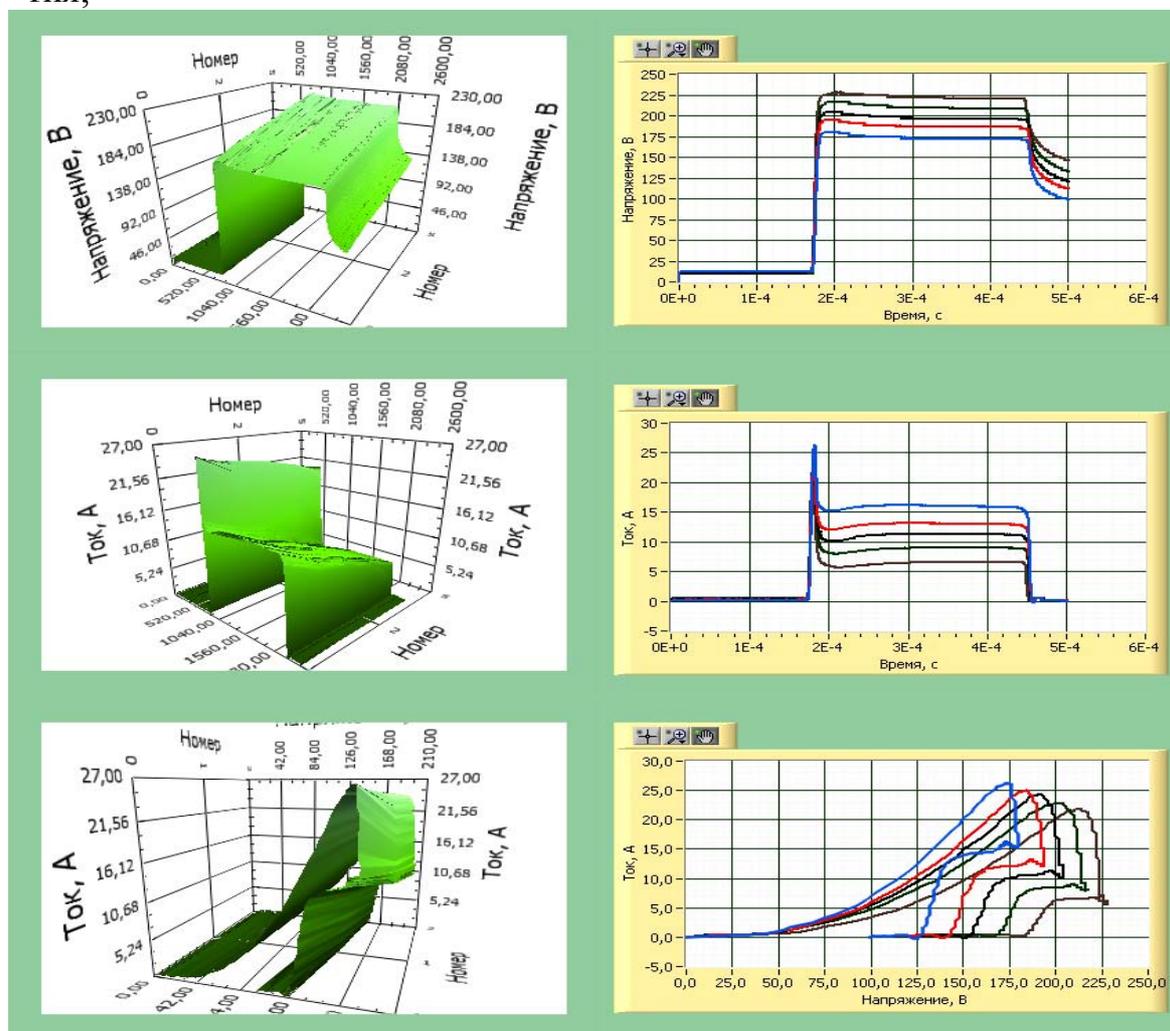


Рис. 19. Интерфейс модуля "3D визуализатор вольтамперных характеристик"

С помощью разработанной измерительной информационной систем показано, что форма тока и ВАХ микроплазменной системы при импульсном трапе-

циевидном воздействии зависят от состава обрабатываемого материала (рис. 20).

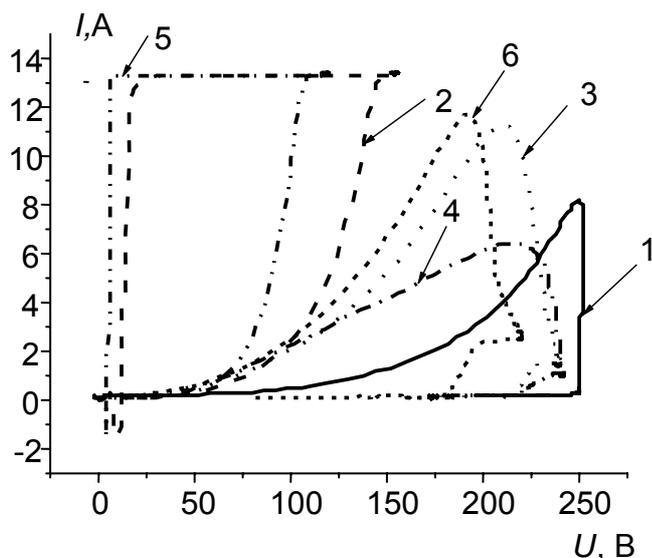


Рис. 20. Вольтамперные зависимости, полученные на сплавах различных марок в электролите состава: $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 12\text{H}_2\text{O}$ – 12г/л; $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$ – 3г/л; H_3BO_3 – 3г/л:
 1 – алюминиевый сплав 2021; 2 – магниевый сплав АМ60В; 3 – алюминиевый сплав АМц,
 4 – алюминиевый сплав АМг; 5 – магниевый сплав AZ91D; 6 – алюминиевый сплав Д16

Это позволило разработать нейросетевой метод идентификации металлов и сплавов обрабатываемого изделия с помощью информации об электрических параметрах сигналов отклика микроплазменной системы на импульсное трапециевидное воздействие. Для этого осуществляют предварительное обучение нейросети, используя мгновенные значения тока и напряжения, полученные во время микроплазменного процесса на образцах с известными свойствами.

Разработанный метод защищен патентом РФ № 2281487 и позволяет на основе информации о материале электрода-изделия производить коррекцию параметров энергетического воздействия для получения покрытия заданного качества. Экспериментальная оценка ошибки распознавания для сплавов алюминия (2021, 7071, АМг) и магния (AZ91D) при использовании в качестве нейросети однослойного персептрона составила 7,5 %. Показано, что точность распознавания зависит от архитектуры нейросети и от количества нейронов.

Если ограничиваться определением параметров математической модели R_T и C_T (рис. 2) на основе измерения мгновенных значений тока микроплазменной системы и поляризационного напряжения, то возникает дополнительная погрешность, обусловленная неточным позиционированием измерительного электрода (рис. 14). Если измерять электропроводность электролита R_p (рис. 2), то эта информация позволяет в значительной мере снизить влияние неточности позиционирования электрода. Для реализации этого подхода в работе предложен программно-аппаратный модуль кондуктометра. Предложенный модульный подход позволил, реконфигурируя структуру КИС (рис. 14), использовать ее аппаратные модули – функциональный генератор и АЦП – для выполнения дополнительных функций измерения электропроводности электролита в диапазоне от 0,1 до 10 См/м с погрешностью не более 2,5 %.

Одним из основных элементов микроплазменной системы является источник энергетического воздействия. Разработана методика выбора структуры и параметров источников питания для конкретного вида микроплазменной обработки изделий. Методика представляет собой набор шагов, которые позволяют принять обоснованное решение по выбору для составления технического задания на проектирование интеллектуальных устройств микроплазменного оксидирования: задание площади обрабатываемого изделия; задание плотности тока; оценка параметров эквивалентной цепи нагрузки; расчет напряжения; определение длительности импульса напряжения; определение частоты следования импульсов напряжения; определение потока энергии; выбор источника первичного электропитания; определение способа накопления энергии; определение количества модулей накопления энергии; выбор модуля разрядного коммутатора; определение количества измеряемых параметров микроплазменного процесса; выбор измерительных модулей; синтез структуры устройств; синтез программного обеспечения.

В соответствии с изложенной методикой были разработаны источники энергетического воздействия, позволяющие производить обработку изделий площадью от 0,01 до 1 м², внешний вид некоторых из них представлен на рис. 21.



а)



б)



в)

Рис. 21. Внешний вид источников энергетического воздействия: а) «Корунд», б) «Corund-M1», в) «Boy-2»

В диссертации рассмотрены вопросы проектирования генераторов для формирования формы сигнала энергетического воздействия (прямоугольный, треугольный, синусоидальный) и проектирование микропроцессорных щитовых измерителей мгновенных значений напряжения и тока, используемых в качестве аппаратных модулей в составе источников энергетического воздействия.

В приложениях приведены акты внедрения и сертификат об утверждении типа средств измерений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель изменений напряжения и тока на границе раздела металл-раствор на начальных стадиях формирования барьерного слоя для импульсного высокоэнергетического воздействия учитывающая выходной импеданс источника энергетического воздействия и отражающая качество получаемого (толщина и пористость) покрытия в терминах электрических величин эквивалентной схемы микроплазменной системы. Проведена экспериментальная проверка адекватности предложенной модели для начальных стадий формирования барьерного слоя при энергетическом импульсном воздействии.
2. Разработан новый метод определения активной и емкостной составляющих тока микроплазменной системы, отражающих качество покрытия, возможность реализации которого основана на трапециевидной форме импульса энергетического воздействия и построении восходящей и нисходящей ветвей вольтамперной зависимости тока от поляризационного напряжения.
3. Разработан метод обработки мгновенных значений напряжения и тока микроплазменной системы с помощью искусственных нейросетей, позволяющий идентифицировать обрабатываемые металлы и сплавы с целью адаптации процесса нанесения покрытия к свойствам материала.
4. Обоснована целесообразность использования в процессе микроплазменного оксидирования в импульсном режиме в качестве первичных преобразователей ток-напряжение коаксиальных резистивных шунтов; проведено моделирование магнитного поля шунта, позволившее автоматизировать инженерные вычисления его параметров. Разработанный шунт используется в составе измерительной системы, введенной в Государственный реестр средств измерений РФ. Разработан метод поверки (калибровки) шунтов, позволяющий производить их поверку методом вольтметра-амперметра с коррекцией погрешностей измерительных каналов по току и напряжению на основе обратного преобразования.
5. Предложен подход к проектированию измерительных информационных систем для исследования, контроля и управления процессом формирования микроплазменных покрытий, базирующийся на модульном подходе и технологии виртуальных приборов. Предложена структура компьютерной системы измерения для исследования высоковольтных напряжений процессов при энергетическом импульсном воздействии на границу металл-раствор с адап-

тивным высоким разрешением. Разработано программное и аппаратное обеспечение ИИС, позволяющее автоматизировать процесс нанесения покрытий.

6. Разработана методика выбора структуры и параметров источников энергетического воздействия для конкретного вида микроплазменной обработки изделий. Изготовленные источники, генераторы для формирования формы сигнала энергетического воздействия (прямоугольный, треугольный, синусоидальный) и микропроцессорные щитовые измерители мгновенных значений напряжения и тока используемых в качестве аппаратных модулей в составе источников энергетического воздействия доказали при эксплуатации свою надежность, эффективность и многофункциональность.
7. На предприятиях ООО “Русский профиль”, г. Красноярск, ОАО “Информационные спутниковые системы им. Решетнева” г. Железногорск, ООО “Манэл” г. Томск, ООО “Сибспарк”, г. Томск, разработаны технологии обработки металлов и сплавов, и внедрены технологические линии по нанесению функциональных и декоративных покрытий на базе разработанных источников импульсных энергетических воздействий: «Корунд», «Corund M1», «Boy», «Boy-2», «Boy-2M», «Boy-3», «Sibspark».

Таким образом, в результате выполнения диссертационной работы внесен существенный вклад в решение важной народно-хозяйственной задачи по созданию средств измерений электрических параметров для управления качеством микроплазменных покрытий и развитие технологий нанесения наноструктурных неметаллических неорганических покрытий в различных сферах науки и производства.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. **Муравьев С.В., Бориков В.Н.** Алгоритмы дискретной математики в измерениях // Измерения, контроль, автоматизация. – 1992. – № 1-2(80) . – С. 20-28.
2. **Мамаев А.И., Дорофеева Т.И., Бориков В.Н., Мамаева В.А.** Вольтамперные характеристики процесса нанесения оксидных и керамических покрытий в импульсном микроплазменном режиме на сплавы алюминия, титана и магния // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 5. – С. 38-43.
3. **Мамаев А.И., Бориков В.Н., Мамаева В.А., Дорофеева Т.И.** Компьютерная система измерения электрических параметров микроплазменных процессов в растворах // Защита металлов. – 2005. – Т. 41. – № 3. – С. 1-6.
4. **Мамаева В.А., Мамаев А.И., Выборнова С.Н., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И.** Исследование процесса формирования биоактивных покрытий на

титане и его сплавах в импульсном микроплазменном режиме // Перспективные материалы. – 2005. – № 1. – С. 52-58.

5. **Мамаева В.А., Мамаев А.И., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И., Будницкая Ю.Ю.** Исследование циклических вольтамперных характеристик в процессе микроплазменного формирования биокерамических покрытий на титане и его сплавах в щелочных электролитах // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 3. – С.48-53.
6. **Мамаев А.И., Дорофеева Т.И., Бориков В.Н., Мамаева В.А.** Применение нейросетей для определения марки сплава при микроплазменном воздействии // Технология металлов. – 2006. – № 6. – С. 37-41.
7. **A. I. Mamaev, V. N. Borikov, V. A. Mamaeva, and T. I. Dorofeeva** A Computer System Measuring the Electrical Parameters of Microplasma Processes in Solutions // Protection of Metals and physical chemistry of surfaces. – Vol. 41. – No. 3. – 2005. – P. 254–258.
8. **Borikov V.** Neural Method Alloys Identification by the Microplasma Oxidation Process in the Electrolyte Solutions // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2006 – Vol. 37. – No. 11. – P. 915-918.
9. **Мамаев А.И., Дорофеева Т.И., Бориков В.Н., Мамаева В.А.** Моделирование начальных стадий формирования покрытия на вентилях металлах при высоковольтном сильноточном импульсном воздействии // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 3. – С.35-43.
10. **Бориков В.Н., Сарычев С.В., Мамаев А.И.** Промышленный источник питания для микродугового оксидирования в водных растворах электролита «Воу-2» // Приборы. – 2007. – № 6. – С.13-16.
11. **Мамаев А.И., Дорофеева Т.И., Мамаева В.А., Бориков В.Н.** Адгезия и пластичность покрытий, полученных микроплазменным оксидированием титана // Технология металлов. – 2008. – № 3. – С. 33-37.
12. **Мамаев А.И., Дорофеева Т.И., Мамаева В.А., Бориков В.Н.** Микроплазменное формирование биологически активных покрытий и их модифицирование лекарственными препаратами // Перспективные материалы. – 2008. – № 3. – С. 51-59.
13. **Дорофеева Т. И., Бориков В. Н., Мамаева В. А., Мамаев А. И.** Взаимосвязь микроплазменного процесса формирования оксидных керамических покрытий на цирконии с вольтамперными характеристиками // Технология металлов. – 2009. – № 5. – С. 35-39.
14. **Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M.** A Computer System: Measurement of Welding Surge Current // Measurement & Control. – 2009. – Vol. 42/2 March. – P. 44-47.
15. **Бориков В.Н., Ким В.Л., Меркулов С.В.** Генераторы тестовых напряжений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 1. – С.23-26.

16. **Бориков В.Н.** Автоматизированный расчет электрических и конструктивных параметров коаксиальных шунтов в графической среде программирования LabVIEW // Приборы. – 2010. – № 3. – С. 42-46.
17. **Баранов П.Ф., Бориков В.Н.** Дистанционный лабораторный практикум на основе графической программной технологии // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2011. – № 1. – С. 81-88.
18. **Бориков В.Н., Баранов П.Ф.** Концепция системы контроля и управления технологическими процессами формирования микроплазменных покрытий // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Том 318. – № 5. – С.120-125.
19. **Бориков В. Н.** Модульная система для измерения удельной электропроводности жидкости // Датчики и системы. – 2011 – № 5 – С. 40-43.
20. **Muravyov S.V., Zlygosteva G.V., Borikov V.N.** Multiplicative method for reduction of bias in indirect digital measurement result // Metrology and Measurement Systems. – 2011. – Vol. 18. – No. 3. – P. 481-490.
21. **Бориков В.Н., Баранов П.Ф., Горисев С.А., Ряшенцев И.В., Цимбалист Э.И.** Сетевая виртуальная лаборатория удаленного доступа по электротехнике // Открытое образование. – 2011. – № 4(87). – С.19-24.
22. **Бориков В.Н., Баранов П.Ф., Цимбалист Э.И., Ким В.Л.** Устройство для испытаний и поверки индуктивных делителей напряжения // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 11(161) – С. 41-45.
23. **Бориков В.Н., Баранов П.Ф., Мамаев А.И.** Программно-аппаратный комплекс для исследования микроплазменных процессов в растворах // Приборы. – 2011. – № 12. – С.53-59.

Монография

24. **Мамаев А.И., Мамаева В.А., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И.** Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – 360 с.

Патенты

25. **Патент РФ № 2281487.** Автоматизированный способ идентификации металлов и сплавов / Мамаев А.И., Мамаева В.А., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И. Оpubл. 10.08.2006, Бюл. № 22.
26. **Патент РФ № 2284517.** Способ определения электрических параметров сильнотоковых импульсных процессов в растворах электролитах и компьютерная система измерения / Мамаев А.И., Мамаева В.А., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И., Бутягин П.И. Оpubл. 27.09.2006, Бюл. № 27.

27. **Патент РФ на полезную модель № 80585.** Устройство для поверки шунтов / Муравьев С.В., Бориков В.Н., Наталинова Н.М. Оpubл. 10.02.2009, Бюл. № 4.
28. **Патент РФ № 2330353.** Способ преобразования химической энергии в электрическую энергию и устройство для его осуществления / Мамаев А.И., Мамаева В.А., Бориков В.Н. Оpubл. 27.07.2008, Бюл. № 21.

Сборники материалов международных конференций

29. **Мамаева В.А., Мамаев А.И., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И., Будницкая Ю.Ю.** Bioactive Ceramic Coatings with Nanoporous and Nanocrystalline Structure Obtained by Microplasma Processes in Electrolytic Solutions // Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites: Proc. Topical Meet. Europ. Ceramic Society. – Russia, Saint-Peterburg, July 5-7, 2004. – P.58.
30. **Мамаев А.И., Бориков В.Н., Мамаева В.А., Дорофеева Т.И.** Computer Aided Measurement System of Electrical Parameters of Pulsed Microplasma Processes in Electrolytic Solutions // Proc. of 7 International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Russia, Tomsk, July 25-29, 2004. – P. 493-496.
31. **Мамаев А.И., Дорофеева Т.И., Мамаева В.А., Бориков В.Н., Будницкая, Макаров А.А.** Voltammetry Characteristics of Ceramic Coatings Obtained by Pulse Microplasma Processes on Aluminium, Titanium and Magnesium Alloys // Proc. of 7 International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Russia, Tomsk, July 25-29, 2004. – P. 340-342.
32. **Мамаева В.А., Мамаев А.И., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И., Будницкая Ю.Ю.** Циклические вольтамперные зависимости в исследовании процесса микроплазменного формирования биокерамических покрытий на титане и его сплавах // Физико-химические процессы в неорганических материалах: Труды IX Международной конференции. – Кемерово, 23-25 сентября 2004. – Ч.2. – С.72-75.
33. **Мамаев А.И., Бориков В.Н., Дорофеева Т.И., Мамаева В.А.** Компьютерная система измерений для исследования импульсных микроплазменных процессов формирования керамических покрытий на вентильных металлах // Физико-химические процессы в неорганических материалах: Труды IX Международной конференции. – Кемерово, 23-25 сентября, 2004. – Ч.2. – С.68-71.
34. **Бориков В.Н., Колomoец Н.В.** Прогнозирование изменения погрешности средств измерений с применением нейронной сети // Качество-стратегия XXI века: Материалы X Международной научно-практической конференции, 7-8 декабря 2005 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 154-156.
35. **Мамаев А.И., Бориков В.Н., Попова Е.А.** Метрологическое обеспечение покрытий микродугового оксидирования // Качество-стратегия XXI века:

Материалы X Международной научно-практической конференции, 7-8 декабря 2005 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 138-139.

36. **Бориков В.Н., Муравьев С.В.** Компьютерная система измерений и регистрации параметров режима сварки // Повышение надежности сварных соединений при монтаже и ремонте технологического оборудования в энергетике: Доклады 2-го научно-практического семинара, 6-8 декабря 2005г. – Киев: Экотехнология, 2005. – С. 45-46.
37. **Borikov V.** Neural-method alloys identification by the microplasma process in the electrolyte solutions // Information technology and electrical engineering - devices and system, materials and technologies for the future: Proc. of Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (51.IWK), 11-15 September 2006. – Ilmenau: Verlag ISLE, 2006. – P. 321-322.
38. **Muravyov S.V., Borikov V.N., Kaysanov S.A.** Computer system for measurement of welding process parameters // Metrology for a Sustainable Development: XVIII IMEKO WORLD CONGRESS – Brazil, Rio de Janeiro, September 17 – 22, 2006. – P. 121.
39. **Borikov V.N., Stukach O.V., Popova E.A.** Control of the Microplasma Process in Electrolyte Solutions Based on STATISTICA Model // Proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). – Russia, Tomsk, April 20-21, 2007. – P. 58-63.
40. **Borikov V.** Linear Parameter-Oriented Model of Microplasma Process in Electrolyte Solutions // Computer Science Meets Automation: Proc. of Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (52.IWK). – Germany, Ilmenau, September 10-13, 2007. P. 89-94.
41. **Borikov V.** Measurement System for Coating Quality Control During High Current Process in Electrolyte Solution // Proceedings of the 9th International IMEKO Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC). – India, Madras, November 21-24, 2007. – P. 121-126.
42. **Borikov V.N.** Computer System for Measurement of High Voltage Signal during Plasma Process in Solution // Proc. of the 16th IMEKO TC-4 International Symposium “Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements” and 13th Workshop on ADC Modelling and Testing. – Italy, Florence, September 22-24, 2008. – P. 254-258.
43. **Mamaeva V.A., Mamaev A.I., Borikov V.N., Dorofeeva T.I.** Pulsed High Power Action and Technology of Nanostructural Bioceramic Coatings // Materials of 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Russia, Tomsk, September 22-26, 2008. – P. 367-368.
44. **Borikov V.N., Baranov P.F., Bezshlykh A.D** Virtual Measurement System of Electric Parameters of Microplasma Processes // Proc. IEEE International

Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2009). – Russia, Tomsk, March 27-28, 2009. – P. 275-279.

45. **Borikov V.** Virtual Electrolyte Conductivity Analyzer for Microplasma // Proc. of 17th Symposium IMEKO TC4 “Instrumentation for the Information and Communication Technology Era”. – Slovakia, Kosice, September 8-10, 2010. – P. 14-18.

Подписано к печати 30.01.2012. Формат 60x84/18. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 2,04. Уч.-изд.л. 1,84.

Заказ 65-12. Тираж 120 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Тел/факс: +7(3822)56-35-35, www.tpu.ru