

**ПАРФЕНОВ Евгений Владимирович**

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ  
ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН  
НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ  
ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА**

**Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Уфа – 2012**

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный консультант	доктор технических наук, профессор <b>Горбатов Станислав Анатольевич</b>
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор <b>Белкин Павел Николаевич,</b> кафедра общей физики ФГБОУ ВПО «Костромской государственной университет им. Н. А. Некрасова»
	доктор технических наук, профессор <b>Зориктуев Вячеслав Цыденович,</b> кафедра автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
	доктор технических наук, профессор <b>Рапопорт Эдгар Яковлевич,</b> кафедра автоматики и управления в технических системах ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
Ведущая организация	ОАО «Институт технологии и организации производства» (ОАО НИИТ, г. Уфа)

Защита диссертации состоится «25» мая 2012 г. в 10 часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03  
в Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, Республика Башкортостан, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «20» апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.



В. В. Миронов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Современные наукоемкие электротехнологические процессы позволяют осуществлять высокоэффективную модификацию поверхностных слоев при производстве ответственных деталей энергетических машин. К таким процессам относится электролитно-плазменная обработка (ЭПО), позволяющая наносить или удалять защитные покрытия, проводить очистку и полирование поверхностей, осуществлять химико-термическую обработку. От традиционных методов ЭПО выгодно отличается экологической безопасностью производства за счет использования компонентов рабочих растворов, не относящихся к сильнодействующим ядовитым веществам.

За последние три десятилетия научными школами под руководством Н. А. Амирановой, В. В. Баковца, П. Н. Белкина, Ф. М. Гайсина, П. С. Гордиенко, С. В. Гнеденкова, М. Д. Клапкива, М. М. Криштала, И. С. Куликова, Б. Р. Лазаренко, В. В. Любимова, А. И. Мамаева, Ю. В. Магуровой, Л. А. Снежко, А. М. Смыслова, И. В. Сумина, О. П. Терлеевой, А. В. Тимошенко, Ю. Н. Тюрина, Л. А. Ушомирской, В. А. Федорова, В. И. Черненко и др. в России и странах СНГ, а также за рубежом под руководством Г. Гупта, А. Ерохина, У. Клайна, Дж. Куррана, А. Маттьюза, У. Малайоглы, П. Скелдона, Дж. Томсона и др. проведен значительный объем исследований физико-химических и технологических аспектов электролитно-плазменных процессов. Разработанная теоретическая база позволяет выйти на внедрение в современное производство технологических процессов электролитно-плазменного полирования и плазменно-электролитического (или микродугового) оксидирования ответственных деталей энергетических машин, таких, как рабочие лопатки турбомашин и поршни двигателей внутреннего сгорания, что обеспечивает повышение их эксплуатационных характеристик. Маркетинговые исследования показывают перспективность применения процессов электролитно-плазменной обработки в секторах замещения гальванических покрытий, подготовки поверхности под нанесение ионно-плазменных покрытий и в инновационных областях применения.

В настоящее время существует объективная потребность промышленных предприятий в автоматизации процессов электролитно-плазменной обработки при производстве деталей энергомашин, так как неопределенность по ряду факторов, таких, как технологическая наследственность, степень выработки электролита, качество электроснабжения, снижает эффективность обработки. Особенность динамики выходных параметров процессов ЭПО, характеризующих состояние поверхности, заключается в насыщении в окрестности предельно достижимого значения при заданном сочетании входных технологических параметров. Кажущийся здесь временной резерв обеспечения целевых свойств поверхности в условиях неопределенности, на производстве оборачивается выходом геометрических размеров детали за пределы допуска и неоправданно завышенным энергопотреблением. Решение данной проблемы возможно при создании автоматизированных систем терминального управления процессами электролитно-плазменной обработки. При этом, одной из наиболее важных функций такой системы управления является диагностика неконтролируемых переменных объекта управления – целевых свойств поверхности, таких как толщина покрытия, шероховатость поверхности, микротвердость и других. Такие автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) должны содержать модули диагностики неконтролируемых переменных и модули поддержки принятия решения о достижении терминального момента окончания процесса, что позволит повысить скорость и качество обработки поверхности, уменьшить процент брака по вине технолога-оператора при изготовлении доро-

гостоящих деталей простой и сложной конфигурации и снизить энергоемкость производства.

Для автоматизированного управления технологическими процессами гальванотехники и анодирования разработаны методы диагностики состояния поверхности в ходе обработки, основанные на фундаментальных закономерностях электрохимических процессов, используемых в сочетании с экспертной визуальной оценкой качества обработки технологом-оператором. Однако данные методы лишь ограниченно применимы для диагностики процессов электролитно-плазменной обработки, которые проводятся при повышенных напряжениях порядка 100...600 В. Такие напряжения приводят к появлению парогазовой оболочки и микроразрядов вблизи поверхности обрабатываемой детали, и определяют электрохимическое, плазмохимическое, электроэрозионное, тепловое и гидродинамическое воздействие на обрабатываемую поверхность, а также выдвигают повышенные требования к электробезопасности.

В настоящее время рядом исследователей выборочно установлены взаимосвязи между основными свойствами обрабатываемой поверхности и небольшим числом характеристик электрических, акустических и оптических параметров электролитно-плазменных процессов, однако системно не обоснованы физические закономерности, по которым возможна диагностика состояния неконтролируемых переменных процесса ЭПО как объекта управления (ОУ). Данный факт объясняется сложностью и нелинейностью электролитно-плазменных процессов, по сути относящихся к распределенным многосвязным объектам, что и создает серьезные проблемы при создании автоматизированных систем терминального управления процессами ЭПО.

Среди указанных физических параметров электролитно-плазменных процессов, электрические параметры, такие, как напряжение и ток, оказываются наиболее информативными, так как они непосредственно связаны с фундаментальными законами физико-химических явлений, происходящих в ходе ЭПО, наименее зашумлены и обеспечены наиболее широким диапазоном датчиков в составе систем сбора и обработки данных. Преобразование характеристик процесса ЭПО как распределенного объекта управления, к которым относятся распределение потенциала в электролите и парогазовой оболочке, распределение плотности тока, толщины покрытия и шероховатости по поверхности детали, в интегральные электрические параметры, такие, как ток электролизера и напряжение между анодом и катодом, существенно уменьшает информативность канала диагностики локальных свойств поверхности. Данное обстоятельство создает значительную неопределенность в контуре управления технологическим процессом ЭПО, особенно увеличивающуюся при одновременной обработке нескольких деталей в одном электролизере. Однако существует мощное средство повышения информативности каналов диагностики, используемое в смежных областях и заключающееся в применении спектральных методов анализа мгновенных значений напряжения и тока, создающих дополнительную координату в пространстве состояний – частоту, которая также имеет непосредственную связь с фундаментальными кинетическими законами физико-химических преобразований поверхностного слоя в ходе процессов ЭПО.

**Формулирование проблемы.** Таким образом, широкому внедрению и эффективному использованию автоматизированных технологических процессов электролитно-плазменной обработки в энергомашиностроении препятствует нерешенная до настоящего времени **проблема** разработки методологических и теоретических основ создания автоматизированных систем терминального управления на базе спектральных методов диагностики неконтролируемых свойств поверхности по характеристикам электрических параметров процесса электролитно-плазменной обработки.

Актуальность проблемы подтверждается следующими грантами, при поддержке которых выполнены исследования: грант Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук № МК-1271.2004.8 (2004–2005 гг.); гранты Федерального агентства по науке и инновациям «Проведение научных исследований молодыми учеными по приоритетным направлениям развития науки и техники» № 02.442.11.7501 и «Выполнение научно-исследовательских работ молодыми учеными и преподавателями во время проведения стажировок в зарубежных научных центрах» № 02.444.11.7245 (2006 г.); грант Британского королевского общества для развития совместного сотрудничества с Университетом Шеффилда (2007 г.); грант Британского совета по техническим и физическим наукам (EPSRC) для развития междисциплинарных исследований (2008 г.); грант Республики Башкортостан для молодых ученых и молодежных научных коллективов (2009 г.).

**Цель работы.** Разработка метода терминального управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе спектральных методов диагностики состояния объекта, обеспечивающего повышение производительности, качества обработки, экологической безопасности и снижение энергоемкости при производстве деталей энергетических машин.

**Основные задачи,** которые потребовалось решить для достижения цели:

1. Экспериментальное исследование механизма процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления для установления оптимальных сочетаний управляющих воздействий, приводящих к целевой модификации поверхности деталей энергетических машин (*соответствует п. 3 паспорта специальности*).

2. Разработка феноменологической модели на основе исследования характеристик процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления (*соответствует пп. 3 и 4 паспорта специальности*).

3. Формализованное описание объекта управления на основе нейросетевых математических моделей для восстановления закономерностей процессов электролитно-плазменной обработки, скрытых в экспериментальных данных (*соответствует пп. 4 и 15 паспорта специальности*).

4. Определение границ применимости математических моделей с сосредоточенными параметрами при формализованном описании распределенных процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления по результатам решения краевой задачи расчета электрического поля в электролизере (*соответствует п. 4 паспорта специальности*).

5. Разработка спектральных методов диагностики состояния объекта управления на основе его активной и пассивной идентификации для извлечения информации о состоянии неконтролируемых переменных путем сбора и обработки данных об электрических параметрах процессов ЭПО (*соответствует пп. 6 и 10 паспорта специальности*).

6. Разработка метода терминального управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе спектральных методов диагностики состояния объекта (*соответствует п. 3 паспорта специальности*).

7. Разработка и апробирование аппаратно-программных комплексов для реализации метода терминального управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе спектральных методов диагностики состояния объекта, обеспечивающих повышение производительности и качества обработки, снижение энергоемкости и улучшение экологической безопасности производства (*соответствует п. 10 и п. 18 паспорта специальности*).

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы системного анализа, статистического спектрального анализа, аналоговой и цифровой

обработки сигналов, разработки проблемно-ориентированного программного обеспечения, а также методы теории информационных систем. Для построения моделей объекта управления и их анализа использовались методы теории электромагнитного поля, нелинейных электрических цепей, методы конечных элементов и многосеточных моделей, численного интегрирования, методы нейросетевого моделирования и регуляризации нейросетевых моделей при решении обратных задач. Для изучения характеристик объекта управления использовались методы планирования эксперимента, рентгенофазового анализа поверхности, электронной и оптической микроскопии, электрохимической импедансной спектроскопии, измерения шероховатости, градиентные методы оптимизации. Исследование математических моделей и обработка экспериментальных данных проводились на основе оригинальных программ для персональных ЭВМ, составленных с использованием пакетов прикладных программ *MATLAB*, *LabView* и *Visual Studio*.

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов основана на использовании апробированных научных положений и методов исследования, корректном применении математического аппарата и методов обработки данных, согласовании новых результатов с известными теоретическими положениями.

Достоверность полученных теоретических и методологических положений и выводов работы подтверждается комплексом экспериментальных исследований и результатами имитационного моделирования. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением современных средств измерения свойств поверхности, обработанной в ходе ЭПО, использованием сертифицированной и аттестованной измерительной аппаратуры, корректной статистической обработкой данных эксперимента.

### **Научная новизна**

1. Новизна результатов исследования процессов ЭПО как объектов управления заключается в выявлении диапазона оптимальных сочетаний управляющих воздействий, таких, как напряжение источника и температура электролита, для целевой модификации поверхности, *и отличается* установлением механизма воздействия парогазовой оболочки и микрозарядов, *что позволяет* сформулировать методологические основы для выбора класса управлений процессами электролитно-плазменной обработки.

2. Новизна разработанной феноменологической модели процесса ЭПО как объекта управления состоит в выявлении взаимосвязей между контролируемыми и неконтролируемыми переменными объекта управления на основе представлений о воздействии микрозарядов и парогазовой оболочки на обрабатываемую поверхность, *и отличается* системным объединением известных закономерностей процессов с формированием оксидного слоя и процессов с формированием парогазовой оболочки, *что позволяет* сформулировать единые теоретические основы для разработки метода терминального управления технологическими процессами ЭПО.

3. Новизна разработанных математических моделей процесса ЭПО заключается в установлении нейросетевых структур, обеспечивающих восстановление и формализацию взаимосвязей между контролируемыми и неконтролируемыми переменными объекта управления, выявленных в рамках феноменологической модели, *отличающихся тем*, что для регуляризации обратной задачи и обоснования адекватности моделей использован байесовский подход, *что позволяет* проводить оптимизацию процессов электролитно-плазменной обработки и разрабатывать интеллектуальные алгоритмы терминального управления объектом.

4. Новизна решения краевой задачи расчета электрического поля в электролизере заключается в установлении границ применимости математических моделей с сосредото-

точными параметрами при формализованном описании распределенных процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления, *и отличающегося тем*, что учтена параметрическая нелинейность объекта, а именно, зависимость тока от напряжения источника и температуры электролита, *что позволяет* использовать модели объекта с сосредоточенными параметрами для решения обратных задач оптимизации, диагностики и управления процессами ЭПО.

5. Новизна спектральных методов диагностики процессов ЭПО заключается в разработанных методологических основах активной и пассивной идентификации состояния объекта управления на основе сбора данных и анализа электрических характеристик, таких, как изменяющиеся во времени оценки импедансного спектра и спектра переменной составляющей тока, *отличающихся* установлением взаимосвязей между неконтролируемыми и контролируемыми переменными состояниями объекта в ходе обработки, *что позволяет* создавать новые способы оперативной диагностики целевых свойств поверхностного слоя, таких как толщина покрытия, шероховатость поверхности и других (патенты РФ №№ 2133943, 2240500, 2227181, 2366765).

6. Новизна метода терминального управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки заключается в формировании оптимальных сочетаний управляющих воздействий и в управлении моментом прерывания процесса, *отличающихся тем*, что управляющие воздействия формируются в виде напряжения на электролизере и температуры электролита, стабилизируемых во времени по первому контуру управления, а терминальный момент прерывания процесса определяется во втором контуре управления на основе разработанных спектральных методов диагностики, *что позволяет* создавать новые способы и алгоритмы терминального управления процессами ЭПО (патенты РФ №№ 2119975, 2202451, 2360045).

7. Новизна аппаратно-программных комплексов заключается в реализации метода терминального управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки, *отличающегося* использованием оптимальных сочетаний управляющих воздействий, спектральных методов пассивной и активной идентификации объекта по электрическим характеристикам и интеллектуальных алгоритмов терминального управления объектом, *что позволяет* повысить производительность и качество обработки, снизить энергоемкость для существующих процессов ЭПО и улучшить экологическую безопасность производства при замене традиционных процессов обработки поверхности на процессы электролитно-плазменной обработки с управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.

### **Практическая значимость работы**

1. Использование оптимальных сочетаний управляющих воздействий на процесс ЭПО позволяет повысить скорость электролитно-плазменных процессов оксидирования алюминиевых сплавов типа BS6082, полирования мартенситных сталей, подобных ЭИ-961ш и 20X13, дает возможность удаления покрытий: нитрида титана с нержавеющей сталей, аналогичных ЭИ-961ш, хромового и алюминидного с никелевых сплавов, подобных ХН60ВТ и ЖС6У, и создает условия для применения систем терминального управления объектом на основе спектральных методов диагностики.

2. Применение феноменологической модели ТП ЭПО на практике позволяет автоматизировать и целенаправленно проводить электролитно-плазменные процессы оксидирования, полирования и удаления покрытий при изготовлении и ремонте ответственных деталей энергетических машин на основе установленных закономерностей изменения свойств поверхностного слоя, таких как толщина покрытия, шероховатость по-

верхности, полнота удаления покрытия, в зависимости от напряжения источника питания, температуры электролита и длительности обработки.

3. Разработанные нейросетевые математические модели процесса ЭПО аппроксимируют динамику изменения толщины покрытия, шероховатости поверхности и других технологических параметров в зависимости от напряжения и температуры электролита и позволяют оптимизировать сочетание входных технологических параметров процесса ЭПО по заданным критериям качества и ограничениям. Разработанные инверсные нейросетевые модели обеспечивают функционирование модуля интеллектуальной диагностики процесса ЭПО по спектральным характеристикам в составе АСУ ТП.

4. Решение краевой задачи расчета электрического поля в электролизере ТП ЭПО позволяет осуществлять оптимизацию геометрических размеров технологических ванн с учетом параметрической нелинейности объекта управления на стадии проектирования.

5. Применение разработанных спектральных методов диагностики процессов ЭПО обеспечивает создание новых способов идентификации неконтролируемых переменных объекта управления по электрическим характеристикам с относительной погрешностью порядка 10 % для осуществления функции контроля в составе АСУ ТП.

6. Применение разработанного метода терминального управления обеспечивает создание новых способов и алгоритмов управления процессами электролитно-плазменной обработки, основанных на сочетании оптимальных значений управляющих воздействий, спектральных методов диагностики неконтролируемых свойств поверхности и интеллектуальных средств поддержки принятия решения о наступлении терминального момента окончания процесса.

7. Предложенные аппаратно-программные комплексы для реализации метода терминального управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки позволяют повысить качество оксидирования, полирования и удаления покрытий при изготовлении и ремонте деталей энергомашин, снизить процент брака путем исключения перетравливания поверхности, уменьшить энергопотребление в 1,2...1,5 раз за счет исключения времени обработки в конце процесса, не приводящего к целевому модифицированию поверхности и повысить в среднем на 25 % экологическую эффективность производства при замене традиционных процессов обработки поверхности на процессы ЭПО с управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.

Практическая значимость результатов подтверждается их использованием в УГАТУ, в Университете Шеффилда, на ОАО «КумАПП» и на ОАО «УМПО». Совместно с ОАО «КумАПП» создана научно-исследовательская лаборатория плазменно-электролитического оксидирования деталей вертолетной техники.

#### **На защиту выносятся:**

1. Механизмы процессов электролитно-плазменной обработки как методологическая основа разработки систем управления.

2. Феноменологическая модель процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления.

3. Нейросетевые математические модели процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления.

4. Результаты определения границ применимости математических моделей с сосредоточенными параметрами при формализованном описании процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления.

5. Спектральные методы диагностики процессов электролитно-плазменной обработки, обеспечивающие извлечение информации о состоянии неконтролируемых переменных объекта управления из контролируемых электрических характеристик.

6. Метод терминального управления технологическими процессами ЭПО на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.

7. Аппаратно-программный комплекс для реализации метода терминального управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, наиболее значимые из которых: Всероссийская конференция «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления», Таганрог, 1996, 2004; III Международная конференция «Электромеханика и электротехнологии», Клязьма, 1998; Международная конференция «Передовые технологии на пороге XXI века», Москва, 1998; Международная конференция «Технология, инновация, качество-99», Казань, 1999; III Международная конференция «Применение научных результатов конверсии для международного сотрудничества», Томск, 1999; Всероссийская научная конференция «Управление и информационные технологии», Санкт-Петербург, 2003; Европейские конгрессы (EUROMAT-2003, EUROMAT-2009), Лозанна, Швейцария, 2003, Глазго, Великобритания, 2009; I, II и III Международные конференции «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей», Кострома, 2003, 2007, 2010; IV Международная конференция «Идентификация систем и проблемы управления (SICPRO'05)», Москва, 2005; Международная конференция Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) «Современная техника и технологии» (МТТ-2005), Томск, 2005; Международные конференции (ICMSTF-2007, ICMSTF-2008, ICMSTF-2010, ICMSTF-2011), Сан-Диего, США, 2007, 2008, 2010, 2011; V Международная конференция «Математическое моделирование технологий обработки материалов» (ММТ-2008), Самария, Израиль, 2008; V Международная конференция и Симпозиум «Электрические методы обработки материалов», посв. 100-летию со дня рождения академика Б. Р. Лазаренко, Кишинев, Молдавия 2010; VI Международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», Ялта, Украина, 2010; 61-й ежегодный Конгресс Международного общества электрохимии, Ницца, Франция, 2010; Всероссийская конференция «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения», Уфа, 2010; XVI Международный конгресс двигателестроителей, Рыбачье, Украина, 2011; Российская научно-практическая конференция, посв. 85-летию со дня рождения чл.-корр. РАН Р. Р. Мавлютова «Мавлютовские чтения», Уфа, 2011.

#### **Связь исследований с научными программами**

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники Уфимского государственного авиационного технического университета в рамках следующих программ: Федеральной программы Министерства науки и технологий РФ «Наукоемкие технологии» на 1995–2000 годы, головная организация – Инженерный научно-производственный центр «Технология» при Самарском государственном аэрокосмическом университете; Федеральной целевой научно-технической программы Федерального агентства по науке и инновациям «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 годы; договора о творческом сотрудничестве на 2009–2014 годы с Университетом Шеффилда (Великобритания) в об-

ласти диагностики и управления процессами электролитно-плазменной обработки; договора о сотрудничестве на 2011–2016 годы с ОАО «Кумертауское авиационное производственное предприятие» в области разработки технологических процессов плазменно-электролитического оксидирования, имеющих современные системы автоматизации, управления и диагностики.

**Публикации.** Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в 56 печатных работах, в том числе в 11 статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 6 статьях в рецензируемых научных журналах, издаваемых за рубежом, 1 главе в рецензируемой коллективной монографии, изданной за рубежом, 7 патентах РФ и 5 свидетельствах об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, включает 371 страницу текста, содержит 165 иллюстраций, 57 таблиц и библиографический список из 220 наименований.

Все научные положения, сформулированные в диссертации, получены соискателем лично. Соискатель с благодарностью отмечает, что на формирование его научного мировоззрения значительное влияние оказали С. А. Горбатков (научный руководитель кандидатской и научный консультант докторской диссертации), У. Гарднер (Университет Калифорнии, Дэвис, США), А. Л. Ерохин (Университет Шеффилда, Великобритания) и Р. Р. Невьянцева (научный руководитель кандидатской диссертации).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна работы и ее практическая значимость, приведены результаты апробации и реализации.

**В первой главе** проанализировано современное состояние и известные подходы к исследованиям в области автоматизации технологических процессов ЭПО. Показана актуальность решаемой проблемы на основе анализа направлений научных исследований в предметной области управления процессами электролитно-плазменной обработки и в смежных областях знания. Обоснована необходимость построения АСУ ТП ЭПО, содержащих модули диагностики состояния объекта и поддержки принятия решения об окончании обработки.

Большой вклад в понимание физико-химических и технологических закономерностей процессов ЭПО внесли работы В. В. Баковца, В. И. Белеванцева, П. Н. Белкина, П. С. Гордиенко, А. Л. Ерохина, А. А. Кособуцкого, Б. Р. Лазаренко, А. И. Мамаева, Г. А. Маркова, Р. Р. Невьянцевой, П. Скелдона, Л. А. Снежко, И. В. Суминова, А. В. Тимошенко, Дж. Томсона, Ю. Н. Тюрина, А. В. Эпельфельда, А. А. Факторовича, И. З. Ясногородского и других авторов. В исследованиях М. Буонэ, В. Н. Борилова, С. Вердье, И. Голосного, А. Л. Ерохина, Дж. Куррана, В. Б. Людина, Ю. В. Магуровой, В. А. Мамаевой, Э. Матыкиной, Ф. Мекюсон, Ф. Монфорта, А. Д. Погребняка, Т. Попорта, А. Г. Ракоч и других авторов предложены подходы к диагностике процессов электролитно-плазменной обработки по электрическим, акустическим и оптическим параметрам, а также подходы к программному управлению процессом. Однако в силу сложности объекта управления, АСУ ТП ЭПО, содержащие модули диагностики его состояния, не разрабатывались. В работах В. В. Атрощенко, В. И. Васильева, С. А. Горбаткова, В. П. Житникова, А. Н. Зайцева, В. Ц. Зориктуева, Б. Г. Ильясова, Ю. Г. Кабалдина, Г. Г. Куликова, А. Г. Лютова, Б. Н. Петрова, Ю. П. Портнова-Соколова, Э. Я. Рапопорта, М. Ю. Сарилова и других авторов разработаны теоретические и методологические основы создания современных систем управления сложными техническими объектами, в том

числе, технологическими процессами механической, электрохимической, электротермической и электроэрозионной обработки с использованием диагностики неконтролируемых переменных состояния объекта. В работах Дж. Бендата, Д. Ваттса, У. Гарднера, В. В. Губарева, Г. Дженкинса, А. Пирсола, С. Кея, А. Н. Колмогорова, С. Марпла, А. Оппенгейма, С. А. Прохорова, А. Б. Сергиенко, Р. Шафера, Я. З. Цыпкина и других авторов представлены классические и современные методы сбора данных и спектрального анализа сигналов. Данные работы являются базисом для дальнейших исследований и учитывались автором в своей работе.

Проведен анализ особенностей процессов ЭПО как объектов управления, систематизированы современные представления об электролитно-плазменных процессах и проведена их классификация, проанализированы характеристики и модели процессов. Рассмотрены особенности процессов электролитного нагрева, химико-термической обработки, плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО), электролитно-плазменного полирования (ЭПП), удаления покрытий (ЭПУП). Показано, что электролитно-плазменная обработка отличается от электрохимической наличием парогазовой оболочки (ПГО) и микроразрядов вблизи модифицируемой поверхности детали. Проанализированы известные модели процессов ЭПО, большая часть которых – феноменологическая, так как сложность описываемых процессов велика для теоретического рассмотрения обработки тел даже простой формы, причем модели предложены только для узкого набора процессов ЭПО. Показана своевременность разработки феноменологической модели объекта управления, обобщающей информацию о процессах, протекающих в ходе электролитно-плазменной обработки.

Проведен анализ состояния исследований в области диагностики и управления процессами электролитно-плазменной обработки. Выявлено, что не установлены физически обоснованные закономерности, связывающие измеримые электрические, акустические и оптические параметры процесса ЭПО с неизмеримыми в ходе обработки переменными состояния объекта. Установлено, что мониторинг электрических параметров – напряжения и тока электролизера позволяет разрабатывать способы пассивной идентификации параметров процесса электролитно-плазменной обработки. Показано, что по интенсивности звуковых колебаний можно судить о стадиях процесса плазменно-электролитического оксидирования. Выявлено, что мониторинг оптических параметров позволяет получать значительный объем информации о состоянии системы и диагностировать ее технологические параметры. Анализ спектра излучения микроразрядов позволяет судить о физико-химических процессах, протекающих в ходе ЭПО. Однако сложная динамика оптических спектральных параметров не позволяет напрямую использовать их для оценки толщины модифицированного слоя. Следовательно, наиболее доступными для измерения и установления физического смысла являются электрические характеристики процессов ЭПО, поэтому методы диагностики следует разрабатывать, в первую очередь, на их основе. Учитывая отмеченное в классификации процессов ЭПО существенное различие вольтамперных характеристик (ВАХ) для электролитно-плазменных процессов с падением напряжения на парогазовой оболочке и с падением напряжения на оксидном слое, для них следует разрабатывать различающиеся методы диагностики.

Проведена классификация известных систем управления в области автоматизации процессов ЭПО и в смежных областях с позиций создания АСУ ТП на основе диагностики состояния объекта. Показано, что для процессов ЭПО известны системы стабилизации технологических параметров, системы программного управления режимами обработки и автоматизированные системы управления длительностью процесса по таймеру.

Для процессов механической и физико-технической обработки известны АСУ ТП, содержащие модули диагностики неконтролируемых переменных объекта управления. О наличии для процессов ЭПО подобных АСУ ТП в настоящее время неизвестно.

На основе проведенного анализа современного состояния и известных подходов к автоматизации процессов ЭПО сделан вывод о том, что на сегодняшний день в предметной области автоматизированного управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки деталей энергетических машин существует целый ряд нерешенных проблемных вопросов, к основным из которых можно отнести следующие:

- процессы ЭПО не исследованы с позиций теории автоматического управления, и не разработаны модели этих процессов как объектов управления;
- не установлены границы применимости математических моделей с сосредоточенными параметрами при описании распределенных процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления;
- не установлены физически обоснованные закономерности и конкретные спектральные параметры процессов ЭПО, по которым возможна диагностика состояния неконтролируемых переменных объекта управления;
- не формализованы методы извлечения информации о состоянии неконтролируемых переменных из спектральных характеристик физических параметров процессов электролитно-плазменной обработки;
- не разработаны методы терминального управления процессами ЭПО на основе спектральных методов диагностики состояния объекта, приводящие к повышению качества поверхности и снижению энергопотребления.

Таким образом, нерешенность отмеченных проблемных вопросов вызывает серьезные затруднения при проектировании автоматизированных систем управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки деталей энергетических машин, обеспечивающих требуемое качество поверхности при решении вопросов энергосбережения и экологической безопасности. С учетом вышеизложенного, сформулирована решаемая в работе проблема, поставлена цель и определены задачи исследования.

**Во второй главе** приведены результаты исследования характеристик процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления. Представлены результаты экспериментального исследования выходных характеристик процессов ЭПО – свойств поверхностного слоя модельных образцов деталей энергетических машин. Результаты получены с использованием методов планирования эксперимента для процессов ПЭО, ЭПУП и ЭПП.

Рассмотрены результаты восстановления закономерностей процессов ЭПО, скрытых в экспериментальных данных, с помощью нейронных сетей. Получены математические модели объекта управления и восстановлены закономерности изменения толщины модифицированного слоя и шероховатости поверхности, а также других параметров, от напряжения  $U$ , температуры электролита  $T^\circ$  и длительности обработки  $t$ . Выявлены механизмы процессов электролитно-плазменной обработки, формирующие методологическую основу для разработки систем управления (таблица 1).

С помощью полученных нейросетевых моделей проведена оптимизация управляющих воздействий для выбранного класса управлений. Пример для процесса удаления алюминидного покрытия приведен на рисунке 1.

Рассмотрено решение краевой задачи расчета электрического поля в электролизере при электролитно-плазменной обработке с параметрической нелинейностью, вносимой нелинейной ВАХ объекта управления, определяемой свойствами квазистационарной ПГО, толщина которой намного меньше расстояния между анодом и катодом.

Таблица 1 – Механизмы процессов ЭПО как методологическая основа разработки систем управления

Тип ЭПО	Покрытие / подложка (основа)	Тип металла – покрытие / основа сплава	Отличительные свойства процесса	Превалирующий механизм воздействия	Критерий оптимизации	Ограничение по качеству поверхности	Диапазон оптимальных сочетаний управляющих воздействий
ПЭО	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / BS6082 (Al)	Вентильный / вентильный	Формируется стационарный оксидный слой	2H <sub>2</sub> O – 4ē → O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> xMe + yO <sub>2</sub> → Me <sub>x</sub> O <sub>2y</sub> Тепловое и электро-эрозионное воздействие микродуговых разрядов	Скорость роста покрытия $\left( R = \frac{\Delta h}{\Delta t} \right)$	Отношение содержания оксидов модификаций α и γ (r <sub>α/γ</sub> )	U <sub>0</sub> =240...280 В U <sub>1</sub> =320...360 В (T° = 15...20° C)* и U=540...560 В (T° = 15...20° C)**
ЭПУП	TiN / ЭИ-961ш (Fe)	Вентильный / невентильный					
	Cr / ХН60ВТ (Ni)	Невентильный / невентильный	Квазистационарная парогазовая оболочка с переходным типом кипения	Me <sup>0</sup> – nē → Me <sup>n+</sup> 2H <sub>2</sub> O – 4ē → O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> Гидродинамическое воздействие ПГО Воздействие тлеющего разряда с электролитным катодом	Доля площади поверхности, освобожденной от покрытия (S <sub>осв</sub> , %) (тонкое или неравномерное покрытие)	Конечная шероховатость (Ra)	U = 300...350 В T° = 50...60° C
	NiAl+Ni <sub>3</sub> Al / ЖС6У (Ni)						
ЭПП	- / ЭИ-961ш (Fe) - / 20Х13 (Fe)		Квазистационарная парогазовая оболочка с пузырьковым типом кипения	2H <sub>2</sub> O – 4ē → O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> Me <sup>0</sup> – nē → Me <sup>n+</sup> Гидродинамическое воздействие пузырьков	Скорость полирования $\left( R = \frac{\Delta Ra}{\Delta t} \right)$	Съем поверхностного слоя (h)	U = 250...320 В T° = 75...85° C

\*Режим большого сигнала. \*\*Режим малого сигнала

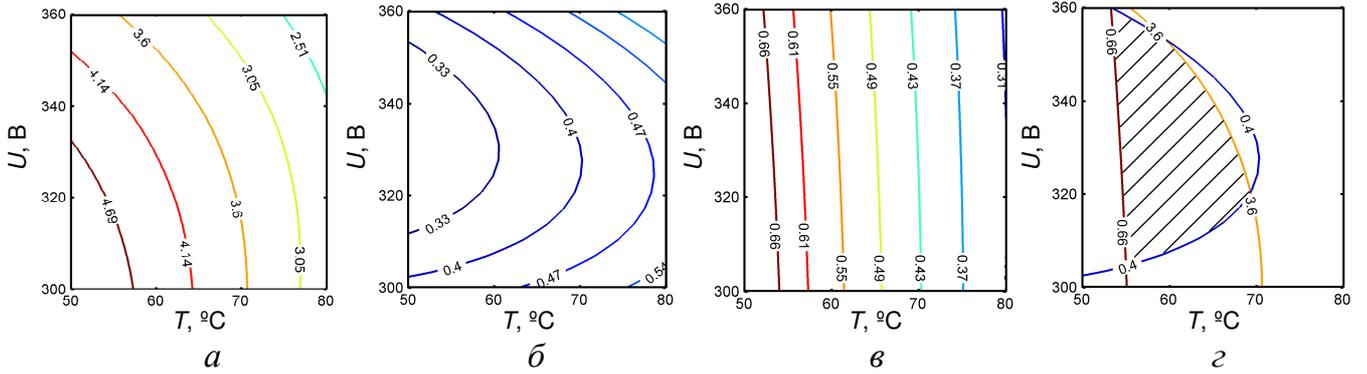


Рисунок 1 – Скорость удаления покрытия ( $\text{мкм}\cdot\text{мин}^{-1}$ ) (а), достигаемая за  $t = 20$  мин шероховатость ( $\text{мкм}$ ) (б), средняя анодная плотность тока ( $\text{А}\cdot\text{см}^{-2}$ ) (в) и область оптимальных сочетаний управляющих воздействий (з) для процесса электролитно-плазменного удаления алюминидного покрытия

Вначале для заданной конфигурации электролизера с граничными условиями первого рода находится распределение потенциала в электролите при заданном напряжении  $U$ , предполагая отсутствие ПГО. Численное решение уравнения Лапласа в декартовой системе координат для потенциала  $\varphi$  стационарного поля в электролите проводится методом многосеточных моделей для всех узлов сетки с координатами  $i, j$ :

$$\frac{\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j}}{(\Delta y)^2} = 0, \quad (1)$$

Далее с использованием закона Ома и граничных условий определяется ток катода

$$I = \left( \sum_{j=1}^n |\delta_{(x)1,j}| \Delta y + \sum_{j=1}^n |\delta_{(x)m,j}| \Delta y + \sum_{i=1}^m |\delta_{(y)i,1}| \Delta x + \sum_{i=1}^m |\delta_{(y)i,n}| \Delta x \right) \cdot z_3, \quad (2)$$

где  $z_3$  – размер модельной системы по оси  $z$ .

Далее решается система уравнений (3–4), описывающая нелинейную электрическую цепь электролизера, содержащую линейное сопротивление электролита и нелинейное сопротивление ПГО, последовательно соединенные с источником напряжения  $U$ :

$$J = (b_0 + b_1 U + b_2 T^\circ + b_3 U T^\circ + b_4 U^4 + b_5 T^{\circ 3}), \quad (3)$$

где  $J$  – ток электролизера,  $b_0 \dots b_5$  – коэффициенты уравнения регрессии ВАХ,  $s$  – площадь анода,  $T^\circ$  – температура электролита (при его перемешивании);

$$U = U_1 + U_2, \quad (4)$$

где  $U_1$  – падение напряжения на электролите,  $U_2$  – падение напряжения на парогазовой оболочке. Решение производится с использованием коэффициента подобия

$$k_{\text{п}} = \frac{U_1}{U} = \frac{J}{I}, \quad (5)$$

примененного к линейной части системы – сопротивлению электролита. Коэффициент подобия уравнивает токи (2) и (3) и позволяет определить долю падения напряжения на электролите  $U_1$  в напряжении  $U$ , приложенном к электролизеру при ЭПО. Также коэффициент подобия масштабирует матрицы потенциалов  $\Phi$  и проекций плотности тока  $\delta$  в узлах сетки и позволяет определить истинное распределение потенциала  $\Phi_1$  и плотности тока  $\delta_1$  в электролизере:

$$\Phi_1 = \Phi \cdot k_{\text{п}}, \quad (6)$$

$$\delta_{1(x)} = \delta_{(x)} \cdot k_{\text{п}}, \quad \delta_{1(y)} = \delta_{(y)} \cdot k_{\text{п}}. \quad (7)$$

Пример зависимости  $k_{\text{п}}$  от входных параметров ТП ЭПО приведен на рисунке 2.

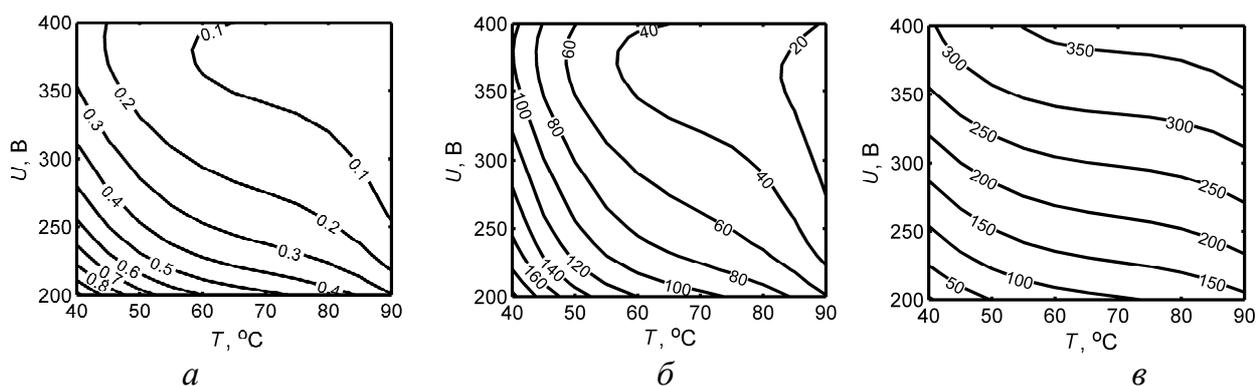


Рисунок 2 – Пример зависимости коэффициента подобия  $k_n$  (а), падения напряжения на электролите  $U_1$  (б) и на парогазовой оболочке  $U_2$  (в) от условий ЭПО

В соответствии с определением отличительных особенностей процесса ЭПО, большая часть падения напряжения приходится на ПГО, что задается неравенством

$$k_n < 0,5, \quad (8)$$

которое определяет границы применимости моделей с сосредоточенными параметрами.

Результаты решения краевой задачи могут быть использованы для определения активного сопротивления электролита, входящего в любую схему замещения, используемую для интерпретации импедансных спектров процессов ЭПО.

Далее представлена феноменологическая модель технологического процесса электролитно-плазменной обработки как объекта управления (рисунки 3 – 4), научной основой порождения которой является анализ механизма явления и последующая декомпозиция явления на подпроцессы. Данная модель рассматривает систему «источник питания – электролизер – обрабатываемая поверхность» как систему с сосредоточенными параметрами, характеризующими интегральные свойства поверхностного слоя и интегральные параметры технологического процесса.

На верхнем уровне модели выделены основные элементы системы, объединенные контуром протекания технологического тока: рабочий электрод, его поверхностный слой, парогазовая оболочка, объем электролита, противоэлектрод, источник электрической энергии, а также контуром теплообмена: электролит и источник тепловой энергии.

На первом уровне модели находятся процессы, происходящие в подсистемах (см. рисунок 3), на втором и третьем – электрические и измеримые характеристики подсистем (см. рисунок 4). Управление процессами 2.1 в поверхностном слое обрабатываемой детали, опосредованно через процессы 3.1, 4.1, 1.1 и 5.1 (по убыванию значимости влияния) можно осуществлять с помощью управления источником электрической энергии 6 и источником тепловой энергии 7, при условии идентификации подсистем 1–5.

Второй уровень феноменологической модели – электрические характеристики подсистем, включающий электрофизические, электротехнические и полевые характеристики. Так, при наличии сплошной ПГО, на ней падает практически все напряжение источника, что соответствует высоким значениям средней напряженности электрического поля, приводящим к развитию в ней распределенного электрического разряда, наблюдаемого визуально. При наличии сплошного слабопроводящего оксидного слоя на нем падает практически все напряжение источника, что соответствует высоким значениям средней напряженности поля, приводящим к появлению локализованных микрозарядов в порах оксида, наблюдаемых визуально. В отличие от оксидного слоя, парогазовая оболочка – квазистационарный объект, существующий только в процессе обработки, поэтому при наличии оксидного слоя на поверхности детали до обработки, сплошная парогазовая оболочка, как правило, не образуется.

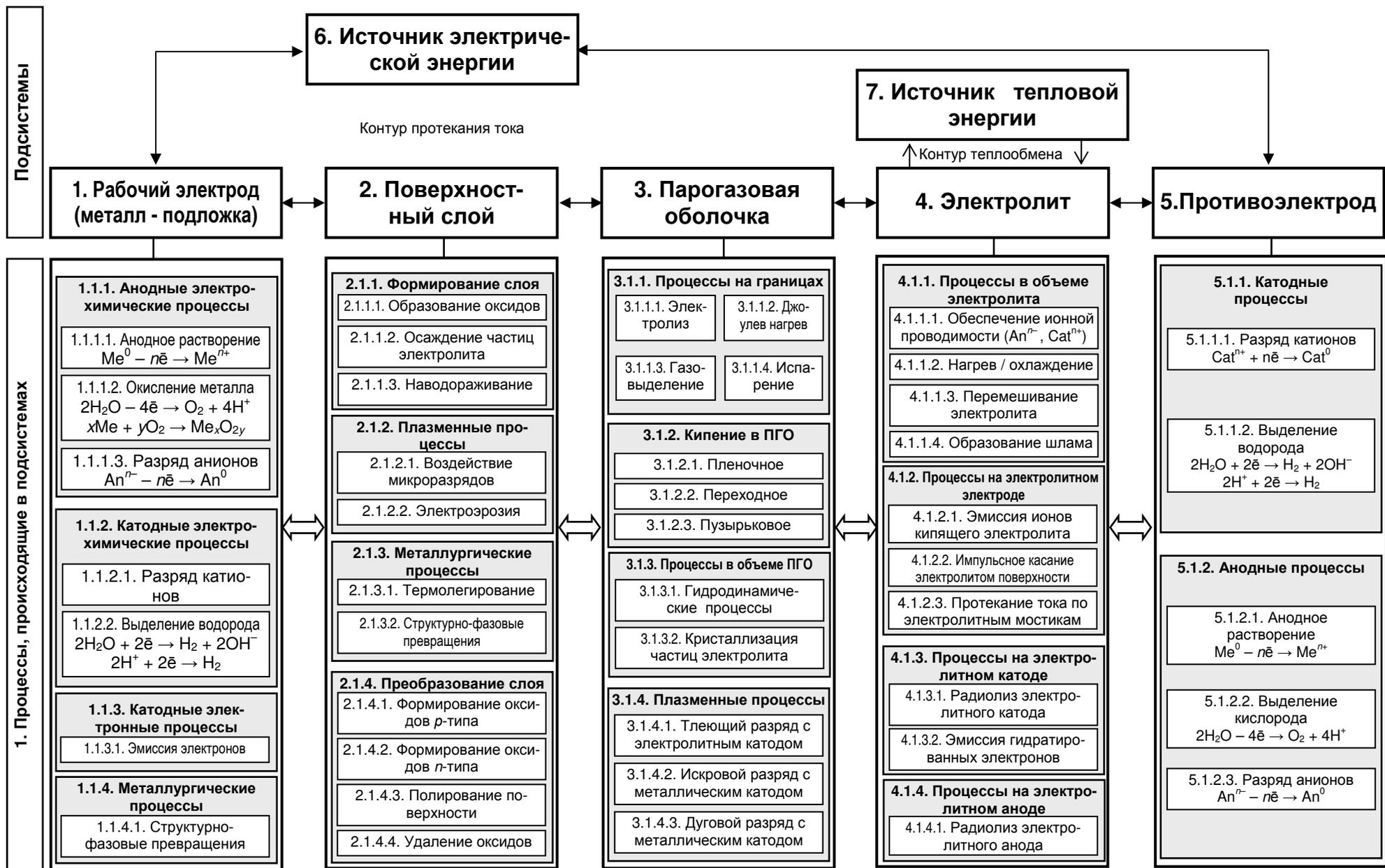


Рисунок 3 – Структура феноменологической модели технологических процессов ЭПО как объектов управления

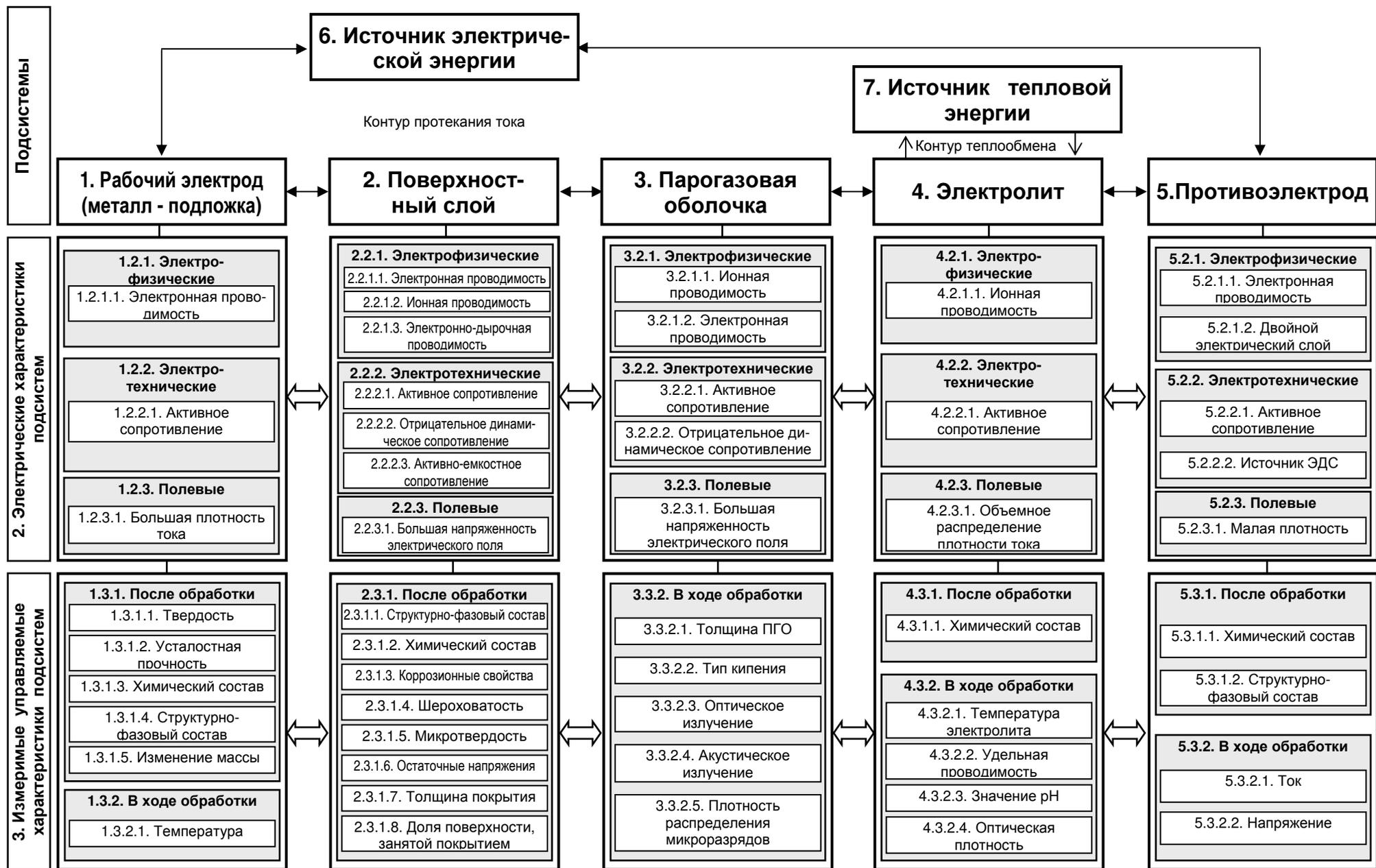


Рисунок 4 – Структура феноменологической модели технологических процессов ЭПО как объектов управления (окончание)

Каждая подсистема характеризуется управляемыми переменными, измеримыми в ходе обработки (контролируемыми), и после обработки (неконтролируемыми). Парогазовая оболочка 3 не существует вне процесса ЭПО, поэтому для нее возможны только измерения в ходе обработки 3.3.2. Измеримые характеристики поверхностного слоя 2 – это целевые характеристики процессов электролитно-плазменной обработки, их общепринятое измерение невозможно в ходе обработки (2.3.1).

Таким образом, для создания модулей диагностики состояния поверхности в составе АСУ ТП ЭПО, возможно использовать косвенные методы извлечения информации о свойствах 2.3.1 на основе оценки свойств 3.3.2, 5.3.2, 1.3.2, 4.3.2, а также на основе измерения электрических характеристик подсистем 1.2.2, 2.2.2, 3.2.2, 4.2.2, 5.2.2 и составления обоснованных схем замещения.

**В третьей главе** рассмотрена разработка спектральных методов диагностики процессов электролитно-плазменной обработки как объектов управления. Спектральные методы на основе анализа частотных характеристик предназначены для изучения линейных инвариантных во времени (стационарных) систем. Однако процесс электролитно-плазменной обработки принципиально является изменяющейся во времени (нестационарной) системой, потому что в его ходе намеренно производится изменение свойств поверхностного слоя, следовательно, свойства системы в целом также изменяются во времени. Более того, данная система является нелинейной из-за фазовых превращений в поверхностном слое, кипения электролита и горения микроразрядов в ПГО. Такой анализ показывает, что процесс электролитно-плазменной обработки является нелинейной нестационарной системой. К счастью, система изменяется во времени достаточно медленно (таблица 2). Данный факт дает возможность определить интервалы времени эргодичности  $T^*$ , в течение которых систему можно рассматривать как инвариантную во времени, так, что усреднение характеристик может быть проведено по времени вместо ансамбля реализаций. В результате процесс электролитно-плазменной обработки может быть представлен как кусочно-линейная стационарная система на каждом интервале времени эргодичности. Такую систему можно описывать частотными характеристиками, принимая во внимание приближенность их оценки.

Разработан метод активной идентификации процессов ЭПО с формированием оксидного слоя по импедансным спектрам объекта управления на основе изменяющихся во времени оценок комплексных частотных характеристик (КЧХ) проводимости электролизера:

$$\hat{G}(t, j\omega) = \frac{\hat{I}(t, j\omega)}{\hat{U}(t, j\omega)}, \quad (9)$$

где  $\hat{I}(t, j\omega)$  и  $\hat{U}(t, j\omega)$  – практически доступные оценки преобразования Фурье для сигналов тока  $i(t)$  и напряжения  $u(t)$  соответственно:

$$\hat{U}(t, j\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) u(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (10)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $a(t)$  – эффективное временное окно, ограниченное временем измерения  $T$ . Импульсоподобная взвешивающая функция окна  $a(t)$  центрирована вокруг момента измерения  $t$  и не равна нулю в пределах  $t \pm T/2$ .

Конечной целью метода активной идентификации является получение модели в виде системы линейных дифференциальных (или разностных) уравнений с медленно изменяющимися параметрами, нелинейно зависящими от условий обработки, и имеющими физический смысл. С позиций управления процессами ЭПО, наиболее ценной частью такой модели будут закономерности изменения параметров в «медленном» време-

ни ( $t$  в (9)), поскольку они определяются динамикой неконтролируемых свойств поверхностного слоя. С другой стороны, параметры дифференциальных уравнений, изменяющиеся в «быстром времени» ( $2\pi/\omega$  в (9)), позволят улучшить понимание физической стороны процесса, поскольку эти уравнения описывают свойства «быстрых» явлений, к которым относятся микроразряды и парогазовые пузырьки.

Разработанный подход основывается на гармоническом анализе и помогает разрешить проблему измерения сдвига фаз, так как он оперирует с амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристиками (АЧХ и ФЧХ)  $\hat{G}(t, \omega)$  и  $\hat{\phi}(t, \omega)$ , которые представляют собой составляющие комплексной частотной характеристики

$$\hat{G}(t, j\omega) = \hat{G}(t, \omega) \exp(j\hat{\phi}(t, \omega)). \quad (11)$$

Выбранный подход требует логарифмической развертки тестового сигнала по частоте в исследуемом диапазоне от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , со скоростью  $\beta$ :

$$\log(\omega) = \beta \left( t - (m - \frac{1}{2})T \right), m = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

Далее используется фильтрация полученных сигналов через ряд из  $K$  полосовых фильтров с КЧХ  $\underline{W}_k(j\omega)$  и полосой пропускания, центрированной относительно каждой исследуемой частоты. Окончательная реконструкция ЧХ происходит для каждого момента времени измерения  $t_m$  (из общего множества из  $M$  доступных отсчетов времени) и для каждой частоты  $\omega_k$  (из общего множества  $K$  доступных частот) следующим образом:

$$\hat{G}(t_m, j\omega_k) = \frac{\hat{I}(t_m, \omega_k)}{\hat{U}(t_m, \omega_k)} \exp(j\hat{\phi}(t_m, \omega_k)), \quad k = 1, 2, \dots, K, m = 1, 2, \dots, M, \quad (13)$$

где  $\hat{I}(t_m, \omega_k)$  и  $\hat{U}(t_m, \omega_k)$  – оценки действующих значений для отфильтрованных сигналов тока и напряжения соответственно, а  $\hat{\phi}(t_m, \omega_k)$  – оценки сдвига фаз между отфильтрованными сигналами, в момент времени  $t_m$ , для частоты  $\omega_k$ .

Оценки КЧХ (13) имеют конечное временное и спектральное разрешение. Временное разрешение  $\Delta t$  равно ширине взвешивающего окна  $a(t)$

$$\Delta t = T, \quad (14)$$

спектральное разрешение  $\Delta f$  формируется шириной полосы пропускания полосовых фильтров  $\underline{W}_k(j\omega)$ . Для логарифмической развертки (12) спектральное разрешение постоянно в логарифмическом диапазоне и равняется

$$\Delta f_{\log} = \lg\left(\frac{\omega_{k+1}}{2\pi}\right) - \lg\left(\frac{\omega_k}{2\pi}\right) = \text{const (в декадах)}. \quad (15)$$

Временное разрешение должно быть меньше интервала эргодичности:

$$\Delta t < T^*. \quad (16)$$

Данное условие гарантирует, что при дальнейшем усреднении по времени будет снижаться влияние случайных возмущений, но не будет устраняться влияние изменяющейся во времени системы на спектральные характеристики сигнала.

Для статистически достоверных измерений величина надежности спектральной оценки  $\tilde{R}$  должна удовлетворять следующему условию:

$$\tilde{R} = \Delta \tilde{t} \Delta \tilde{f} \gg 1, \quad (17)$$

где  $\Delta \tilde{t}$  – эффективное временное разрешение после сглаживания оценок КЧХ по временной координате;  $\Delta \tilde{f}$  – эффективное спектральное разрешение после сглаживания оценок КЧХ по частотной координате.

Практическая реализация метода активной идентификации требует способности источника вводить в выходное напряжение управляемую переменную составляющую с разверткой частоты. Предлагается использование возможностей современных техноло-

гических источников для генерирования импульсных последовательностей, имеющих спектральные характеристики, близкие к гармоническим. Для режима малого сигнала прямоугольные импульсы с коэффициентом заполнения 50 % добавляются к постоянному напряжению. Для режима большого сигнала значения коэффициента заполнения и амплитуды положительных и отрицательных импульсов получаются в результате решения задачи оптимизации спектрального состава импульсов.

Для формирования импульсов был использован метод эквивалентных синусоид, основанный на допущении, заключающемся в использовании вместо эквивалентной синусоиды ее импульсной аппроксимации, полученной с помощью преобразования Уолша. Импульсный сигнал содержит две части: постоянное среднее напряжение  $U_0$  и эквивалентную синусоиду с амплитудой  $U_1$  и разверткой частоты  $\omega$  по формуле (12):

$$u(t) = U_0 + U_1 \cdot \sin(\omega t), \quad (18)$$

В режиме малого сигнала:

$$U_0 \gg U_1, \quad (19)$$

$$u_{SS}(t) = U_0 + B_1 \cdot U_1 \cdot \text{sgn}(\sin(\omega t)), \quad (20)$$

где  $\text{sgn}(\cdot)$  – сигнум-функция, а  $B_1 = \pi/4$ .

В режиме большого сигнала:

$$U_0 \approx U_1, \quad (21)$$

$$u_{LS}(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t) + \sum_{\xi=2}^{\infty} U_{\xi} \sin(\xi \omega t + \varphi_{\xi}), \quad (22)$$

где  $\xi$ ,  $U_{\xi}$  и  $\varphi_{\xi}$  – номер высшей гармоники, ее амплитуда и начальная фаза.

Система сбора и обработки данных должна обеспечивать частоту дискретизации  $f_s$  в соответствии с теоремой В.А. Котельникова, причем для разрешения быстро возрастающих фронтов импульсов и возможных пиков должно выполняться условие:

$$f_s \gg \max\left(\frac{\omega_k}{\pi}\right). \quad (23)$$

Система должна сохранять два одновременных отрезка данных напряжения и тока с длительностью  $t_f$  каждые  $t_a$  секунд. В общем случае  $t_a > t_f$ , однако, желательно  $t_a \rightarrow t_f$ .

Данное условие ограничивается размером буфера памяти системы сбора данных

$$S_b = t_f \cdot f_s \cdot s_{AD}, \quad (24)$$

где  $s_{AD}$  – разрядность выбранного аналого-цифрового преобразователя, а также способностью системы регистрировать поточные данные.

После сбора данных, к ним был применен ряд цифровых КИХ фильтров для восстановления эквивалентных синусоид на каждой изучаемой частоте. Коэффициенты фильтров были получены методом Кайзера. Для минимальных фазовых искажений применялся способ двойного прогона сигнала через фильтр. Действующие значения каждой эквивалентной синусоиды и сдвиг фаз рассчитывались по определению, модуль оценки КЧХ – по закону Ома (13).

Изложенный выше метод активной идентификации позволяет осуществлять диагностику процессов ЭПО как напрямую с использованием информативных диапазонов частот изменяющихся во времени оценок КЧХ, так и с помощью схем замещения, разрабатываемых на их основе по методикам электрохимической импедансной спектроскопии. Примеры импедансных спектров процесса ПЭО приведены на рисунках 5 и 6.

Разработан также метод пассивной идентификации процессов ЭПО на основе изменяющихся во времени оценок спектров переменной составляющей тока или напряжения, которая генерируется парогазовой оболочкой за счет отрицательного наклона рабочего участка ВАХ. Спектральный состав колебаний в информативном сигнале  $y(t)$ , которым в АСУ ТП ЭПО может быть ток  $i(t)$  при работе от источника напряжения или на-

пряжение  $u(t)$  при работе от источника тока, определяется на основе преобразования Фурье. При этом используется финитный спектр  $\underline{Y}_T(t, f)$ , представляющий собой практически доступную оценку преобразования Фурье для сигнала  $y(t)$ , зарегистрированного в течение времени  $T$ , центрированную относительно момента времени измерения  $t$ :

$$\underline{Y}_T(t, f) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} y(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau. \quad (25)$$

Для снижения влияния случайных воздействий используется статистический спектр, усредненный на интервале времени  $\Delta t$ :

$$S_{y_T}(t, f)_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \frac{1}{T} |\underline{Y}_T(v, f)|^2 dv. \quad (26)$$

Для статистического спектрального анализа нестационарных систем уравнение (26) может быть использовано при условии, что интервал времени усреднения меньше интервала времени эргодичности процесса ЭПО (но больше времени измерения  $T$ ):

$$T < \Delta t < T^*. \quad (27)$$

В этом случае при усреднении будет уменьшено влияние случайных возмущений, медленные изменения системы будут прослеживаться в оценках статистических спектров, а получаемые статистические спектры будут изменяться во времени.

Используемые при вычислении периодограммы и при усреднении во времени в уравнении (26) конечные пределы интегрирования могут быть заменены на бесконечные при использовании взвешивающих окон следующим образом:

$$S_{y_T}(t, f) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} y(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \right|^2 = \frac{1}{T} \left| \int_{-\infty}^{\infty} a_T(\tau) y(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \right|^2, \quad (28)$$

где  $a_T(t)$  – временное окно, ограниченное временем  $T$  измерения сигнала.

Расчет статистического спектра (26) может быть представлен в виде свертки периодограммы (28) с импульсоподобным окном  $g_{\Delta t}(t)$  длительностью  $\Delta t$ :

$$S_{y_T}(t, f)_{\Delta t} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{y_T}(t - \tau, f) g_{\Delta t}(\tau) d\tau = S_{y_T}(t, f) \otimes g_{\Delta t}(\tau). \quad (29)$$

Фактически, в формулах (25) и (26) используется прямоугольное окно  $g_{\Delta t}(t)$ .

Выбор окон  $a_T(t)$  и  $g_{\Delta t}(t)$  определяет спектральное и временное разрешение оценки, а также ее надежность и степень утечки спектра. Временное и спектральное разрешение для периодограммы (28) определяется эффективной шириной взвешивающего окна  $a_T(t)$  и составляет соответственно

$$T \text{ и } \Delta f = 1/T. \quad (30)$$

Для усредненной по времени периодограммы (29) спектральное разрешение также равняется  $\Delta f$ . Временное разрешение определяется сглаживающим окном  $g_{\Delta t}(t)$  и равно  $\Delta t$ . Для статистически достоверных измерений величина надежности спектральной оценки также должна удовлетворять условию (17). Степень утечки спектра определяется размером боковых лепестков спектрального окна  $A_{\Delta t}(f)$ , соответствующего временному взвешивающему окну  $a_T(t)$  и представляющему собой его преобразование Фурье

$$A_{\Delta t}(f) = F\{a_T(t)\} \quad (31)$$

и является одним из параметров оптимизации при выборе типа окна. При переходе к цифровой обработке данных используется дискретное преобразование Фурье и вычислительный метод Бартлетта–Уэлча.

Изложенный выше метод пассивной идентификации позволяет осуществлять диагностику процессов ЭПО по изменению спектральных характеристик в информатив-

ных диапазонах частот. Основные результаты статистического спектрального анализа переменной составляющей тока ТП ЭПО приведены на рисунке 7 и свидетельствуют об извлечении информации о состоянии поверхности в ходе обработки.

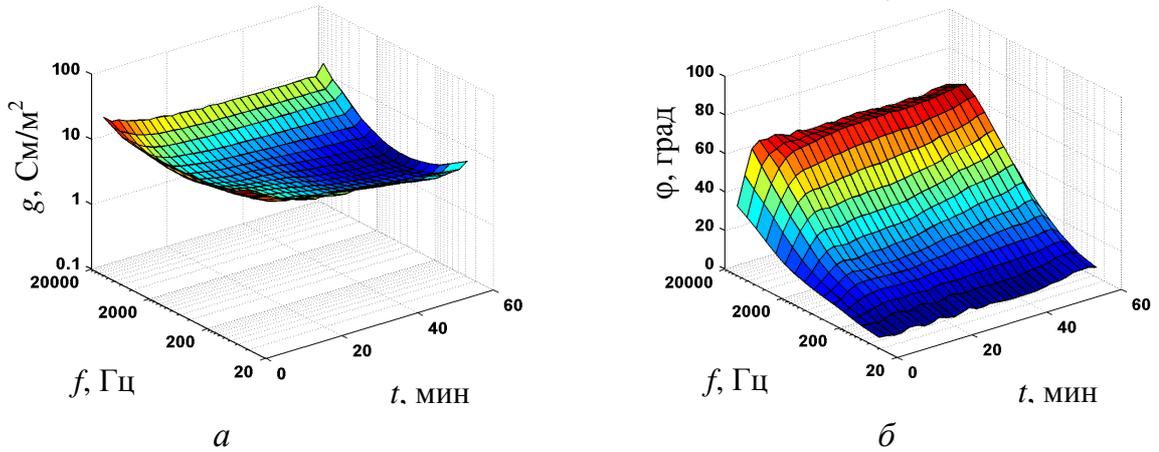


Рисунок 5 – Сглаженная оценка модуля (а) и фазы (б) изменяющейся во времени оценки импедансного спектра процесса ПЭО алюминия в режиме большого сигнала при  $U_0 = 285$  В,  $U_1 = 385$  В

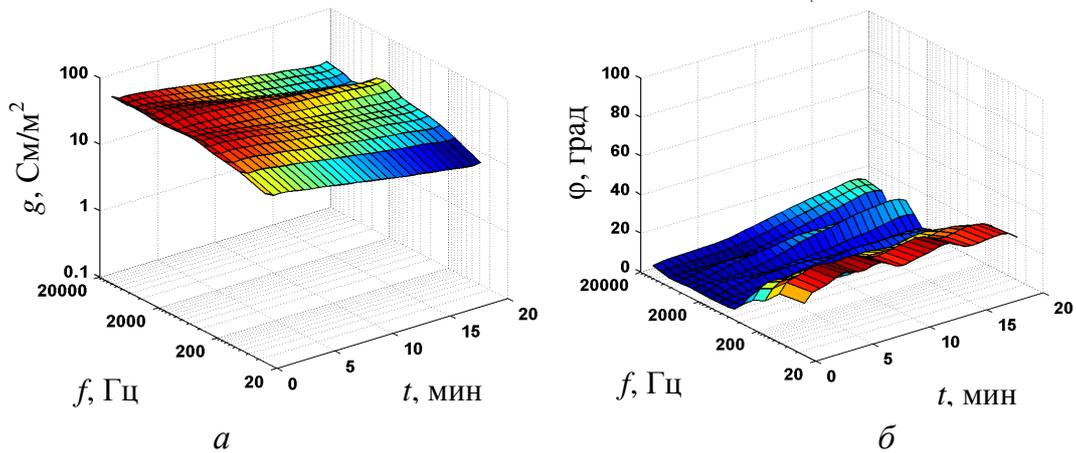


Рисунок 6 – Сглаженная оценка модуля (а) и фазы (б) изменяющейся во времени оценки импедансного спектра процесса ПЭО алюминия в режиме малого сигнала при  $U_0 = 600$  В,  $U_1 = 25$  В

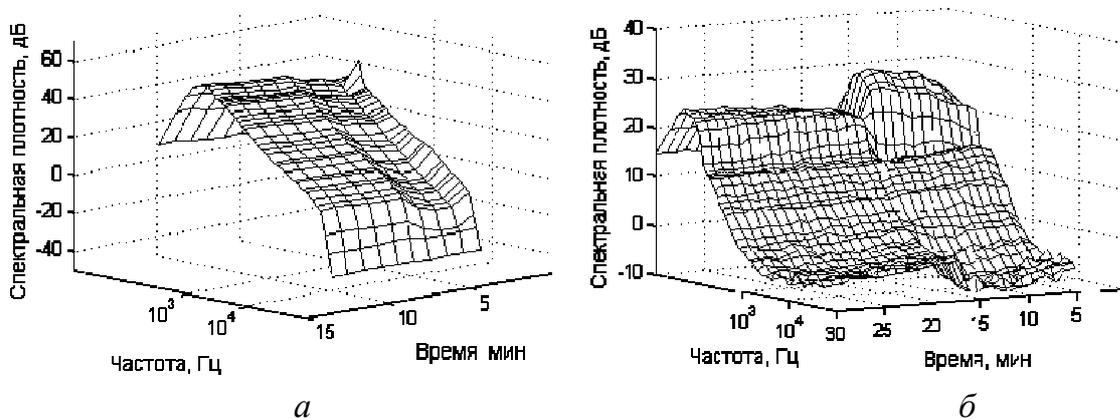


Рисунок 7 – Изменяющиеся во времени оценки спектра сигнала тока при удалении покрытий: нитрид титана,  $U=320$  В,  $T^{\circ}=56$  °С (а); хромовое  $U=370$  В,  $T^{\circ}=50$  °С (б)

По результатам исследования изменяющихся во времени спектральных характеристик процессов ЭПО показано, что активная идентификация состояния поверхности в ходе процессов плазменно-электролитического оксидирования возможна по значениям модуля и фазы импедансного спектра (рисунки 5–6), так как активное сопротивление в его схеме замещения определяется толщиной покрытия.

Также показано, что пассивная идентификация состояния поверхности в ходе электролитно-плазменного удаления покрытий возможна по спектральной плотности мощности (СПМ) колебаний тока, вносимых кипением в парогазовой оболочке (рисунок 7). Момент изменения формы спектра определяет время удаления покрытия. Если покрытие не удаляется, форма спектра во времени не изменяется. Для каждого из изученных покрытий установлен свой диапазон частот, в котором наиболее сильно проявляются изменения свойств поверхностного слоя: для покрытия TiN – на частоте порядка 1000 Гц, хромового покрытия – порядка 2500 Гц, алюминидного покрытия – на низких частотах (оценивается частота выбросов тока). Для процесса ЭПП характерно постепенное снижение оценки спектральной плотности мощности при одновременном сужении спектра. Пассивная идентификация состояния поверхности в ходе электролитно-плазменного полирования возможна по спектральной плотности мощности колебаний тока на частоте 1 кГц, вносимых ПГО. Важно отметить, что изменение спектральных характеристик во времени, коррелированное с изменением поверхностного слоя, проявляется не на всех частотах, в том числе, отсутствует и в среднем значении тока.

В результате сформулированы методологические основы анализа спектральных параметров контролируемых переменных для процессов электролитно-плазменной обработки, позволяющие осуществлять извлечение информации об изменении неконтролируемых переменных объекта – выходных характеристик обрабатываемой поверхности, и формирующие ядро метода терминального управления процессами ЭПО.

**В четвертой главе** представлена разработка метода терминального управления процессами электролитно-плазменной обработки на основе спектральных методов диагностики состояния объекта. Рассмотрена постановка задачи управления и структура АСУ ТП ЭПО, реализующей разработанный метод терминального управления. На данном этапе автоматизации процессов ЭПО решается задача простого синтеза, то есть находится управление  $F(X, t)$ , (где  $X$  – управляющие воздействия,  $t$  – время), не обязательно оптимальное, но приводящее к целевой модификации поверхности:

$$F(X, t) : \{[\Phi_1(F(X, t)) \geq S_1] \cap [\Phi_v(F(X, t)) < S_v] \cap [\delta(t) < \delta_{\max}] \cap [F(X, t) \in F_{\text{доп}}]\}, \quad (32)$$

где  $\Phi_v(\cdot)$  – функционалы качества обработки ( $v = 1 \dots V$ ):  $\Phi_1$  – критерий оптимизации,  $S_1$  – целевое значение критерия оптимизации,  $\Phi_v$  – критерии ограничения,  $S_v$  – предельное значение ограничения,  $\delta(t)$  – текущая плотность тока,  $\delta_{\max}$  – максимальная плотность тока. На класс допустимых управлений накладывается следующее ограничение:  $F_{\text{доп}} = F(\cdot, t) = \text{const}$ , то есть управление постоянно во времени.

Управляющие воздействия  $X$  формируются в виде напряжения источника и температуры электролита, которые стабилизируются во времени в 1-м контуре управления (рисунок 8). Во 2-м контуре реализовано управление терминальным моментом окончания процесса при достижении свойствами поверхности  $S_{\text{п}}$  заданной окрестности желаемых свойств  $S_{\text{ж}}$ . Решение о наступлении терминального момента времени принимается на основе спектральных методов диагностики состояния объекта. Модуль диагностики неконтролируемых переменных состояния объекта  $S_{\text{п}}$  на основе изложенной выше методологии сбора и обработки данных о спектральных характеристиках контролируемых переменных  $C_1$  и  $C_2$  реализует функцию контроля и обеспечивает функционирование модуля поддержки принятия решения об окончании процесса.

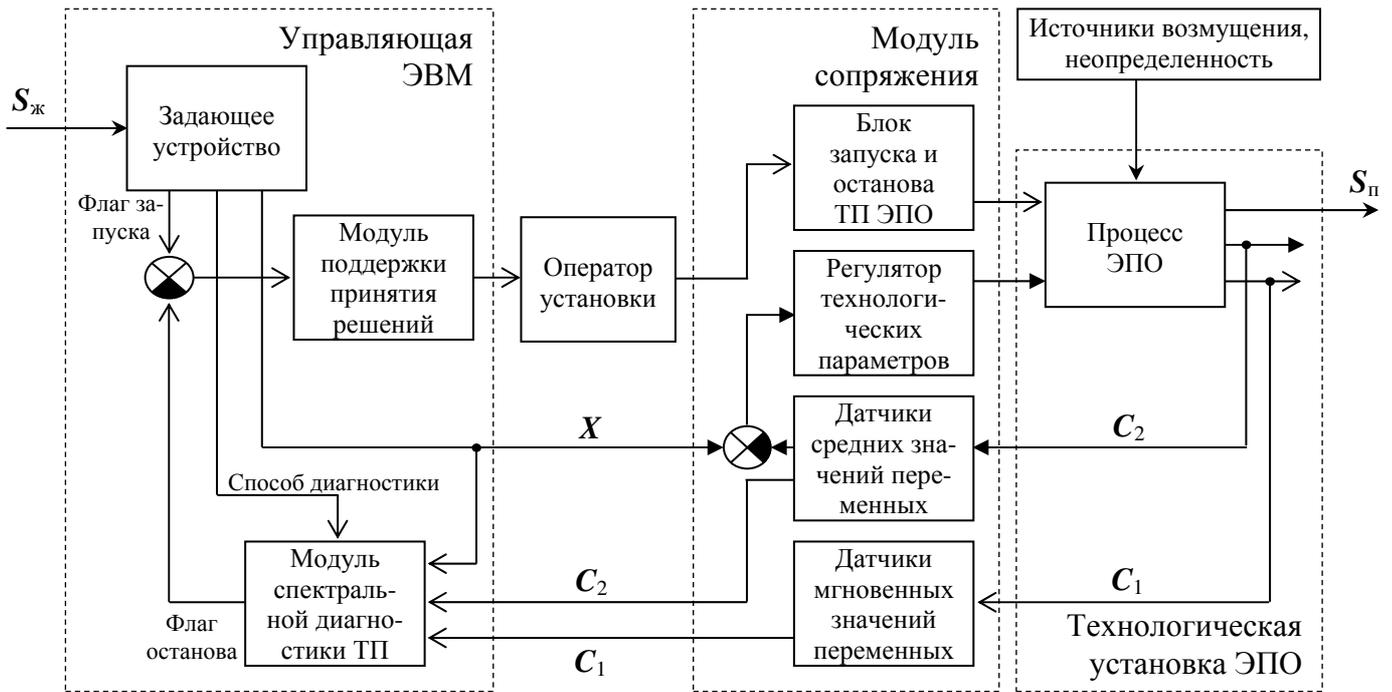


Рисунок 8 – Структурная схема АСУ ТП ЭПО с терминальным управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта

Далее приведены подходы к восстановлению количественных характеристик неконтролируемых параметров процесса ЭПО как объекта управления, с помощью нейросетевых моделей. Сложность объекта управления такова, что на сегодняшний день система дифференциальных уравнений, описывающих процесс ЭПО реальных деталей в рабочих электролитах, не полностью может быть формализована и оказывается неразрешимой из-за недостаточной изученности объекта. Поэтому в данной работе применяется феноменологический подход для описания структуры взаимодействий в объекте управления и подход на основе черного ящика для построения моделей с использованием экспериментально полученных результатов ЭПО модельных образцов.

Разработаны статические нейросетевые модели процессов ЭПО (рисунок 9) для восстановления связей между входными параметрами источников электрической и тепловой энергии  $X$  и неконтролируемыми переменными  $S$ :

$$S = f_1(X, t). \quad (33)$$

Данные модели количественно характеризуют связи, представленные в рамках феноменологической модели. Время  $t$  является входным параметром статической модели и имеет физический смысл длительности обработки при неизменно поддерживаемых величинах вектора  $X$ . Результаты моделирования обсуждаются во второй главе.

Регуляризация и оценка адекватности математических моделей проводится с использованием байесовского подхода применительно к ансамблю нейросетевых параметрических моделей-гипотез  $\{h_q\} \in H, q=1, Q$  взятых из одного класса  $H$  – сетей прямого распространения (многослойный персептрон и сеть с радиальными базисными функциями). Вероятность объяснения данных  $D$  той или иной моделью-гипотезой  $\{h_q\}$  зависит от вероятности  $P(D|h_q)$  в числителе формулы Байеса

$$P(h_q|D|H) = \frac{P(h_q)P(D|h_q)}{\sum_{q=1}^Q P(h_q)P(D|h_q)}, \quad (34)$$

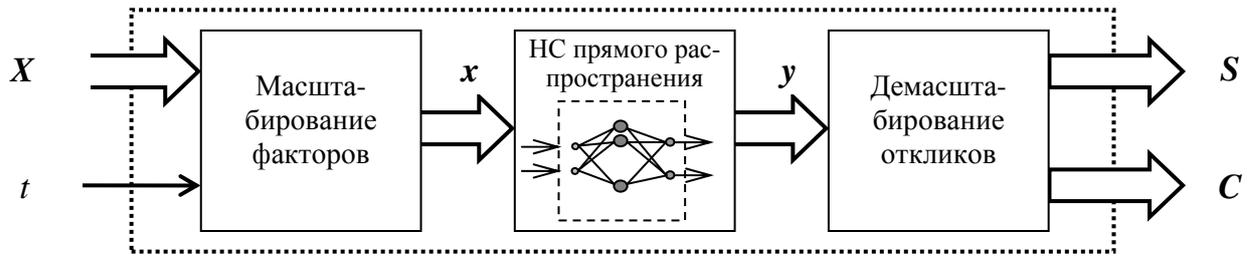


Рисунок 9 – Структура нейросетевой модели-гипотезы  $\{h_q\}$

где  $P(h_q|D|H)$  – апостериорная вероятность гипотезы  $h_q$  о порождении данных  $D$  в рамках принятой мета-гипотезы  $H$  (*posterior*);  $P(h_q)$  – априорная вероятность гипотезы  $h_q$  из класса  $H$  (*prior*);  $P(D|h_q)$  – вероятность, что контролируемые данные порождены гипотезой  $h_q$  (*likelihood*); знаменатель формулы Байеса – это полная вероятность или свидетельство (*evidence*) в пользу того, что данные  $D$  порождены в соответствии с байесовским ансамблем гипотез  $\{h_q\} \in H, q = 1, Q$ .

Нейросети-гипотезы  $h_q$ , имеющие значение  $P(h_q|D|H)$  меньше заданного порогового, отфильтровывались. Оставшиеся нейросети-гипотезы  $h_q^*$ , дающие значение  $P(h_q|D|H)$  выше порогового, формировали байесовский ансамбль нейронных сетей, имеющих различную структуру и значения синаптических весов. Вычисление функций  $f_1, f_2$  и  $f_3$  в уравнениях (33), (35) и (36) осуществлялось как среднее арифметическое для всех нейросетей-гипотез  $h_q^*$ .

Разработаны разностные динамические нейросетевые модели объекта управления для восстановления динамических связей между входными переменными  $X$ , выходными неконтролируемыми переменными  $S$  и контролируемыми переменными  $C = [C_1; C_2]$  (основные: действующее значение тока  $I$ , спектральная плотность мощности тока, а также модуль и фаза импеданса в информативном диапазоне частот). Для динамических моделей время  $t$  не должно фигурировать в качестве входной переменной, и вошло в них в виде длительности дискретного шага  $\Delta t$ , который был определен на основе анализа динамических свойств процесса ЭПО как объекта управления (таблица 2).

Обучение нейросетевых моделей проводилось на таблице обучающих примеров, сформированной по результатам вычислительного и натурального экспериментов как набор строк, содержащих одновременно наблюдающиеся значения факторов и откликов (рисунок 10). Значения переменных, входящих в вектор  $S$ , интерполировались статически нейросетевыми моделями (33), значения переменных, входящих в вектор  $C_1$ , усреднялись на основе разработанных спектральных методов диагностики. Для преобразования таблицы к динамическому виду использовались лаговые переменные первого порядка для величин, имеющих наибольшую постоянную времени.

Таблица 2 – Оценка динамических свойств ТП ЭПО как объекта управления

Вектор выходных переменных объекта	Переменная объекта управления	Постоянная времени, с
Вектор $S$ «медленное» время	Толщина покрытия $h$ , шероховатость поверхности $Ra$ , и др.	100...500
Вектор $C_1$ «быстрое» время $[n]$	Мгновенное значение тока $i$ , мгновенное значение напряжения $u$	$10^{-1} \dots 10^{-4}$
Вектор $C_2$ «компромиссное» время $[m]$	Действующее значение напряжения $U$ , действующее значение тока $I$ , и др.	10...100

Динамическое пространство состояний процесса удаления покрытия									
$m$	$U$	$T^\circ$	$t$	$S_{\text{осв}}(m)$	$Ra(m)$	$S_{\text{осв}}(m-1)$	$Ra(m-1)$	$I$	$p$
	через $\Delta t=15\text{c}$			через $\Delta t=15\text{c}$		через $\Delta t=15\text{c}$		через $\Delta t=15\text{c}$	
Условия опытов				Расчетные данные		Лаговые переменные		Экспериментальные данные	
$m$	$X(m)$		$t(m)$	$S(m)$		$S(m-1)$		$C_2(m)$	$C_1(m)$

Рисунок 10 – Пример формирования пространства состояний процесса ЭП удаления покрытия TiN ( $m$  – дискретное время,  $p$  – СПМ колебаний тока на частоте 1 кГц)

Полученная таблица обучающих примеров является динамическим пространством состояний процесса ЭПО, на котором и обучаются нейросетевые динамические модели объекта управления (рисунок 11а), в общем виде представляющие собой систему нелинейных уравнений для конечных разностей:

$$[S(m), C(m)] = f_2(X(m), X(m-1), S(m-1), C(m-1), \dots, X(m-r_{\text{max}X}), S(m-r_{\text{max}S}), C(m-r_{\text{max}C})), \quad (35)$$

Где  $r_{\text{max}P}$ ,  $r_{\text{max}S}$ ,  $r_{\text{max}C}$  – максимальные значения лагов для векторов  $X$ ,  $S$  и  $C$ .

Предложен способ интеллектуальной идентификации неконтролируемых переменных, применимый для режимов активной и пассивной идентификации спектральных характеристик объекта управления. Способ основан на применении инверсных нейросетевых моделей объекта управления (рисунок 11б), которые обучаются на динамическом пространстве состояний процесса аналогично модели (35) (см. рисунок 10):

$$S(m) = f_3(X(m), C(m), X(m-1), S(m-1), C(m-1), \dots, X(m-r_{\text{max}X}), S(m-r_{\text{max}S}), C(m-r_{\text{max}C})). \quad (36)$$

Основным отличием инверсной динамической модели (36) от прямой динамической модели (35) является использование текущего измеренного значения вектора информативных параметров  $C(m)$  для расчета текущего значения вектора неконтролируемых переменных  $S(m)$ .

Приведены разработанные способы идентификации неконтролируемых переменных объекта управления на основе спектральных методов диагностики. Способы пассивной и активной идентификации представлены в таблице 3.

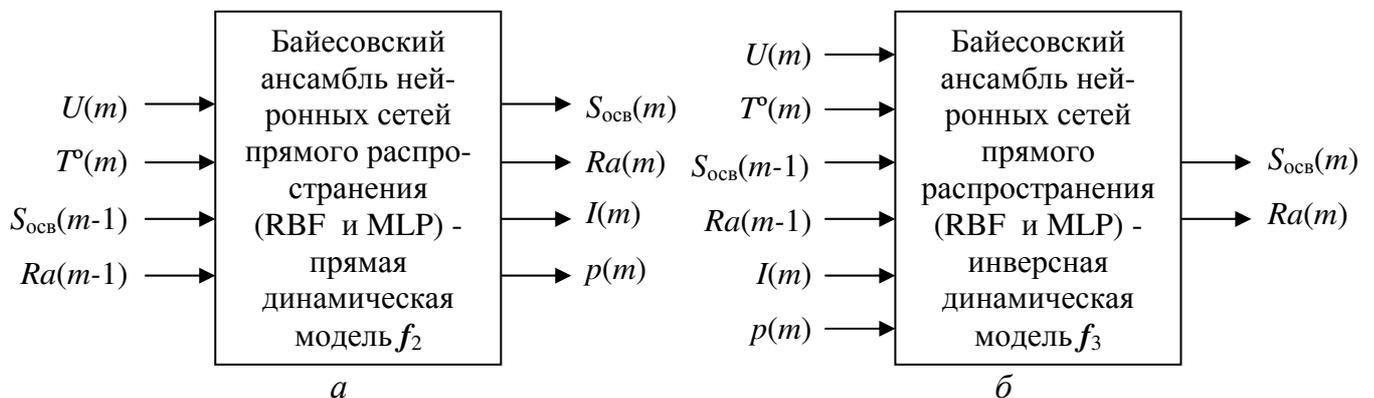
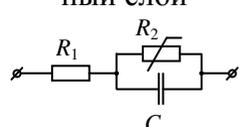
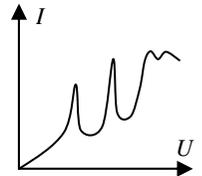
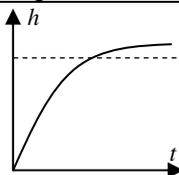
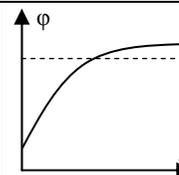
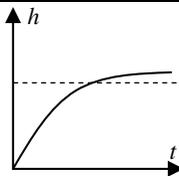
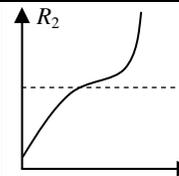
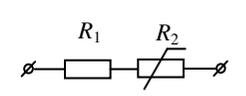
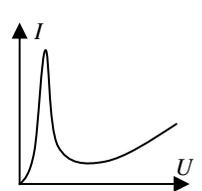
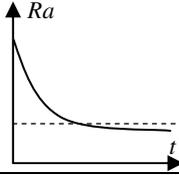
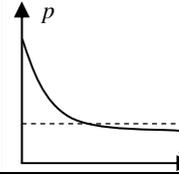
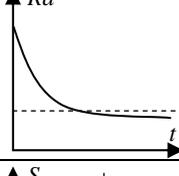
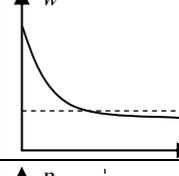
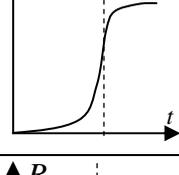
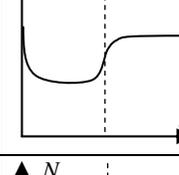
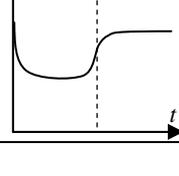
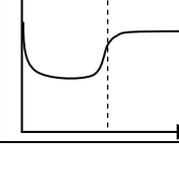


Рисунок 11 – Пример структур прямой и инверсной моделей объекта управления

Таблица 3 – Методология диагностики процессов ЭПО по спектральным характеристикам электрических параметров

Тип идентификации	Специфические свойства объекта управления	Тип ЭПО	Неконтролируемая переменная состояния ОУ	Информативный сигнал	Динамика неконтролируемой переменной ОУ	Динамика информативного сигнала ОУ	Приоритет способа
Активная  (Нужен генератор для оценки частотных свойств)	Формируется оксидный слой  	ПЭО	Толщина покрытия ( $h$ )	Разность фаз между эквивалентными синусоидами тока и напряжения ( $\varphi$ )			Патент РФ № 2366765
				Активное сопротивление покрытия в схеме замещения ( $R_2$ )			Статья АСТ 2011, № 6, С. 7-15
Пассивная  (ПГО генерирует колебания тока в диапазоне 0...10 кГц)	Формируется парогазовая оболочка  	ЭПП	Шероховатость поверхности ( $Ra$ )	СПМ переменной составляющей тока в диапазоне частот 0,5...1,5 кГц ( $p$ )			Патент РФ № 2240500
				Ширина нормированного спектра переменной составляющей тока (по уровню 0,2...0,5) ( $w$ )			Патент РФ № 2133943
		ЭПУП	Площадь поверхности, освобожденной от покрытия ( $S$ )	СПМ переменной составляющей тока в диапазоне частот 0,5...3,5 кГц ( $p$ )			Патент РФ № 2227181
				Скорость удаления покрытия ( $R = \frac{\Delta h}{\Delta t}$ )	Количество выбросов тока в секунду ( $N$ )		

Предложены способы активной идентификации следующих типов.

- С использованием информативных параметров, непосредственно вычисляемых из оценок импедансных спектров. Способ определения момента окончания процесса ПЭО основан на установленной взаимосвязи между фазой оценки импедансного спектра и интенсивностью роста покрытия.

- С использованием аппроксимации изменяющихся во времени оценок КЧХ линейными моделями с переменными параметрами в виде полиномиальных дробей, используемых в теории автоматического управления:

$$W(U_0, U_1, t, s) = \frac{b_1(U_0, U_1, t) \cdot s + b_0(U_0, U_1, t)}{a_1(U_0, U_1, t) \cdot s + a_0(U_0, U_1, t)} \quad (37)$$

Способ определения толщины покрытия в ходе ПЭО основан на установленной взаимосвязи между сопротивлением  $R_2$  в схеме замещения (см. таблицу 3), соответствующей передаточной функции (37), и толщиной покрытия.

Предложены способы пассивной идентификации следующих типов.

- С использованием информативных параметров статистических спектров, плавно изменяющихся пропорционально целевому свойству поверхностного слоя. Способы определения шероховатости в ходе ЭПП основаны на установленной закономерности сужения спектра и соответствующего уменьшения СПМ в информативном диапазоне частот пропорционально снижению шероховатости.

- С использованием информативных параметров статистических спектров, резко изменяющихся по величине в момент, определяющий окончание процесса. Способы определения момента окончания процессов электролитно-плазменного удаления покрытий основаны на установленной закономерности изменения спектра колебаний ПГО при резком изменении свойств поверхности при освобождении поверхности от покрытия.

Таким образом, для предложенного метода терминального управления процессами ЭПО на основе спектральных методов диагностики состояния объекта конкретизированы: структура АСУ ТП, оптимальные сочетания управляющих воздействий, математические модели объекта управления и способы его идентификации. Сформированы теоретические и методологические основы решения поставленной проблемы терминального управления процессами электролитно-плазменной обработки.

**В пятой главе** рассмотрена разработка аппаратно-программных комплексов для электролитно-плазменной обработки деталей энергетических машин с терминальным управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта. Приведены структурные и функциональные схемы аппаратной части автоматизированных установок для процессов с формированием парогазовой оболочки (ЭПП и ЭПУП) и для процессов с формированием оксидного слоя (ПЭО). Разработаны электрические принципиальные схемы ключевых блоков установок.

Предложены алгоритмы терминального управления процессами ЭПО:

- алгоритмы терминального управления процессами ПЭО и ЭПП, реализующие способы активной и пассивной идентификации по пересечению плавно изменяющегося информативного параметра с заданным уровнем (пример приведен на рисунке 12);

- алгоритмы терминального управления процессами электролитно-плазменного удаления покрытий, реализующие способы пассивной идентификации по резкому изменению уровня информативного параметра;

- алгоритмы терминального управления процессами ЭПО с инверсными нейросетевыми моделями.

Разработано программное обеспечение для осуществления способов активной и пассивной идентификации и для реализации метода терминального управления процессами ЭПО на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.

Приведена оценка эффективности применения разработанного метода управления процессами ЭПО. Оценена точность идентификации неконтролируемых переменных объекта управления и показано, что относительная погрешность предложенных способов составляет порядка 10 %, что соответствует погрешности воспроизводимости экспериментальных данных. Оценена энергоёмкость процессов ЭПО, составившая величины порядка 0,8...1,2 Вт·ч/(см<sup>2</sup>·мкм). Применение разработанного метода терминального управления процессами ЭПО позволяет прекращать процесс при достижении заданного значения целевых свойств, исключая тем самым перетравливание поверхности или нанесение покрытия избыточной толщины, и дает возможность снизить энергоёмкость производства в 1,2...1,5 раза. Проведена оценка экологической эффективности по международному стандарту ИСО 14000 для процессов обработки поверхности деталей энергетических машин. Сравнение традиционных методов и электролитно-плазменного метода с терминальным управлением показывает, что для последнего, по результатам балльной оценки, показатели экологической эффективности выше в среднем на 25 %.

Таким образом, решена проблема разработки методологических и теоретических основ создания автоматизированных систем терминального управления процессами ЭПО на основе спектральных методов диагностики неконтролируемых свойств поверхности по характеристикам электрических параметров процесса. При этом обеспечивается повышение производительности процессов ЭПО и качества обработки поверхности, улучшение экологической безопасности и снижение энергоёмкости производства деталей энергетических машин.

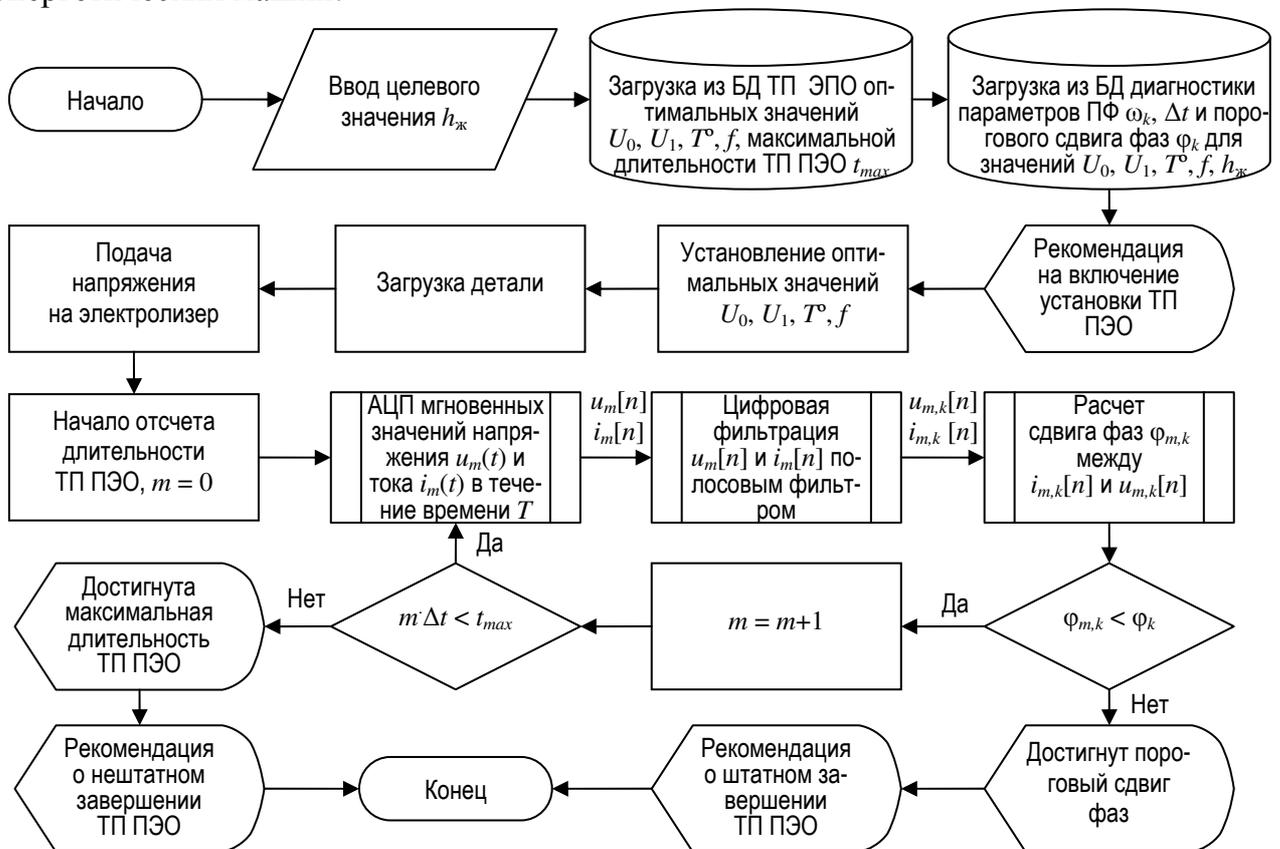


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма терминального управления процессом ПЭО на основе спектрального метода активной диагностики состояния объекта

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе экспериментальных методов исследования объекта управления осуществлен выбор класса терминальных управлений и показана достаточность решения задачи простого синтеза для перевода поверхности обрабатываемой электролитно-плазменным методом детали в заданное конечное состояние. Установлен единый механизм воздействия парогазовой оболочки и микроразрядов, определены сочетания типов кипения и видов микроразрядов и выявлены оптимальные диапазоны управляющих воздействий, обеспечивающие целенаправленное осуществление электролитно-плазменных процессов оксидирования, полирования и удаления покрытий при изготовлении и ремонте деталей энергетических машин.

2. На основе принципов системного подхода сформирована теоретическая база для разработки методов диагностики и управления процессами ЭПО, объединяющая взаимосвязи между контролируемыми и неконтролируемыми переменными объекта управления с использованием представлений о физико-химическом воздействии микроразрядов и парогазовой оболочки на обрабатываемую поверхность, представленная в виде феноменологической модели объекта управления и позволяющая оптимизировать функционирование процессов ЭПО как сложных нелинейных распределенных объектов управления, работающих в условиях неопределенности.

3. На основе байесовского подхода к регуляризации нейросетевых моделей разработаны математические модели объекта управления, обеспечивающие восстановление и формализацию взаимосвязей между контролируемыми и неконтролируемыми переменными, выявленных в рамках феноменологической модели. Прямые нейросетевые модели позволяют оптимизировать процессы электролитно-плазменной обработки как многосвязные нелинейные объекты управления по заданным критериям качества и ограничениям. Инверсные нейросетевые модели обеспечивают функционирование модуля интеллектуальной диагностики объекта управления по спектральным характеристикам и в перспективе позволяют решать обратную задачу оптимального управления.

4. Предложена методика установления границ применимости математических моделей объекта управления с сосредоточенными параметрами при его формализованном описании, разработанная на основе решения краевой задачи расчета электрического поля с учетом параметрической нелинейности объекта, вносимой парогазовой оболочкой и микроразрядами, позволяющая использовать модели объекта с сосредоточенными параметрами для решения обратных задач оптимизации, диагностики и управления процессами электролитно-плазменной обработки.

5. Предложена методология диагностики процессов электролитно-плазменной обработки по спектральным характеристикам объекта, основанная на представлении нестационарной нелинейной системы ЭПО, имеющей три отличающиеся по порядку величины постоянные времени, в виде кусочно-линейной системы с медленно изменяющимися параметрами. Такую систему можно описывать статистическими спектральными методами, обеспечивающими усреднение электрических характеристик, имеющих наименьшую постоянную времени, на интервале времени эргодичности процесса, соответствующему средней постоянной времени. Методология позволяет оценивать изменение неконтролируемых переменных состояния поверхности в ходе обработки по измеримым сигналам, характеризующим контролируемые электрические параметры объекта управления и создавать новые способы диагностики процессов ЭПО.

6. Для процессов ЭПО впервые предложена методология терминального управления на основе диагностики неконтролируемых в ходе обработки свойств поверхностного слоя по спектральным характеристикам электрических параметров объекта.

- Впервые установлены физически обоснованные конкретные спектральные характеристики электрических параметров объекта управления, измерение которых позволяет осуществлять идентификацию неконтролируемых переменных состояния поверхностного слоя в ходе процесса ЭПО.

- Разработаны и запатентованы способы, позволяющие создавать алгоритмы терминального управления, основанные на активной и пассивной идентификации состояния неконтролируемых переменных процессов электролитно-плазменной обработки. Показано, что идентификация шероховатости поверхности, толщины покрытия и других основных характеристик поверхностного слоя по спектральным характеристикам процесса осуществляется с относительной погрешностью порядка 10 %.

- Реализация метода терминального управления обеспечивается формированием оптимальных сочетаний управляющих воздействий и диагностикой момента прерывания процесса, так, что управляющие воздействия формируются в виде напряжения на электролизере и температуры электролита, стабилизируемых во времени по первому контуру управления, что повышает точность и качество обработки, а терминальный момент прерывания процесса определяется во втором контуре на основе разработанных спектральных методов диагностики, что дает возможность парировать отклонения, так как спектральные параметры следуют за состоянием поверхности и позволяют определять по факту момент окончания процесса электролитно-плазменной обработки.

7. Разработаны аппаратно-программные комплексы для реализации предложенного метода терминального управления процессами ЭПО, позволяющие повысить качество оксидирования, полирования и удаления покрытий при изготовлении и ремонте деталей энергомашин, снизить процент брака путем исключения перетравливания поверхности или нанесения покрытия излишней толщины, уменьшить энергопотребление в 1,2...1,5 раз за счет исключения времени обработки в конце процесса, не приводящего к целевому модифицированию поверхности и повысить в среднем на 25 % экологическую эффективность производства при замене традиционных процессов обработки поверхности на процессы электролитно-плазменной обработки с терминальным управлением.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК:*

1. Влияние физико-химического состояния поверхности образцов различной формы на колебания тока при электролитно-плазменной обработке / Р. Р. Невьянцева, Н. Ф. Измайлова, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 2. С. 33–39.

2. Управление технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия / С. А. Горбатков, Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева // Вестник УГАТУ: научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2003. Т. 4, № 1. С. 145–152.

3. Обобщенная математическая модель технологического процесса электролитно-плазменного удаления покрытий / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин // Вестник УГАТУ. Управление, вычислительная техника и информатика: научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2007. Т. 9, № 7 (25). С. 33–40.

4. Математическое моделирование процессов в источнике питания для электролитно-плазменной обработки / Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин, Е. В. Парфенов, А. И. Даутов // Вестник УГАТУ. Управление, вычислительная техника и информатика: научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2008. Т. 10, № 2 (27). С. 131–141.

5. Выбор способа удаления покрытия TiN с поверхности мартенситной стали для разработки технологических рекомендаций ремонта лопаток энергоустановок / Р. Р. Не-

вьянцева, А. А. Быбин, Е. В. Парфенов, Н. Ф. Измайлова // Вестник УГАТУ: научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2009. Т. 12, № 2 (31). С. 103–107.

6. Выбор оптимальных условий удаления алюминидного покрытия с поверхности жаропрочного никелевого сплава электролитно-плазменным методом / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, В. Р. Мукаева // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 4. С. 19–24.

7. Математическое моделирование процесса электролитно-плазменной обработки с использованием нейронных сетей / Е. В. Парфенов, А. Р. Фаткуллин, Д. М. Лазарев, А. Л. Ерохин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. № 3. С. 47–56.

8. Диагностика параметров процесса электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. Л. Ерохин // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 6. С. 7–15.

9. Идентификация технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования / Е. В. Парфенов, Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин, А. Л. Ерохин // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 4. С. 6–13.

10. Управление технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе пассивной идентификации свойств поверхностного слоя / Е. В. Парфенов // Вестник УГАТУ: научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 215–224.

11. Влияние условий обработки на процесс удаления жаростойкого алюминидного покрытия электролитно-плазменным методом при стабилизации температуры электролита / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, В. Р. Мукаева // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 6. С. 65–70.

***Статьи в рецензируемых журналах, издаваемых за рубежом:***

12. Влияние поведения парогазовой оболочки на процесс удаления покрытия электролитно-плазменным методом / R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbakov, E. V. Parfenov, A. A. Bybin // Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 148. P. 30–37. (Опубл. на англ. языке)

13. Управление процессом электролитно-плазменного удаления покрытия TiN. 1. Управление длительностью / E. V. Parfenov, R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbakov // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 199. P. 189–197. (Опубл. на англ. языке)

14. Управление процессом электролитно-плазменного удаления покрытия TiN. 2. Управление напряжением / E. V. Parfenov, R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbakov // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 199. P. 198–204. (Опубл. на англ. языке)

15. Изучение частотных характеристик процесса плазменно-электролитического оксидирования / E. V. Parfenov, A. L. Yerokhin, A. Matthews // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. P. 8661–8670. (Опубл. на англ. языке)

16. Импедансная спектроскопия процесса ПЭО и покрытий на алюминии / E. V. Parfenov, A. L. Yerokhin, A. Matthews // Thin Solid Films. 2007. Vol. 516. P. 428–432. (Опубл. на англ. языке)

17. Изучение частотных характеристик процесса плазменно-электролитического оксидирования в режиме малого сигнала / E. V. Parfenov, A. Yerokhin, A. Matthews // Surface and Coatings Technology. 2009. Vol. 203. P. 2896–2904. (Опубл. на англ. языке)

***Глава в рецензируемой монографии, изданной за рубежом:***

18. Методология сбора данных и обработки сигналов для оценки частотных характеристик электролитно-плазменных процессов обработки поверхности / E. V. Parfenov, A. Yerokhin // Process Control: Problems, Techniques and Applications. Ed. S. P. Werther. New York: Nova Publ., 2012. P. 63–96. (Опубл. на англ. языке)

**Статьи в других изданиях:**

19. Аппаратно-программное обеспечение для исследования электрофизических процессов при электролитно-плазменной обработке поверхности металлов / С. А. Горбатков, Р. Р. Невьянцева, Е. В. Парфенов // *Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ*. 1998. Т. 6, № 3–4. С. 38–43.

20. Оценка экологической эффективности процесса электролитно-плазменного удаления дефектных покрытий с деталей ГТД / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 10. С. 12–16.

**Патенты:**

21. Патент РФ № 2119975, МКИ<sup>4</sup> С25 F 5/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Т. М. Тимергазина, Е. В. Парфенов. Опубл. 10.10.1998.

22. Патент РФ № 2133943, МКИ<sup>4</sup> G 01 B 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Н. Ф. Измайлова, Т. М. Тимергазина, Е. В. Парфенов. Опубл. 27.07.1999.

23. Патент РФ № 2202451, МПК<sup>7</sup> В 23 Н 7/20. Способ управления процессом удаления дефектного покрытия электролитно-плазменным методом / А. И. Михайловский, Р. Р. Невьянцева, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Опубл. 20.04.2003.

24. Патент РФ № 2240500 МПК<sup>7</sup> G 01 B 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности / Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Опубл. 20.11.2004.

25. Патент РФ № 2227181 МПК<sup>7</sup> С 25 F 5/00, 7/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Опубл. 20.04.2004.

26. Патент РФ № 2360045 МПК<sup>7</sup> С 25 F 5/00, 7/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин. Опубл. 27.06.2009.

27. Патент РФ № 2366765 МПК<sup>7</sup> С 25 D 11/00. Способ определения момента окончания процесса плазменно-электролитического оксидирования / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, А. Л. Ерохин, А. Маттьюз. Опубл. 10.09.2009.

**Программы для ЭВМ:**

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007615051. Программа нейросетевого моделирования технологических процессов (на примере электролитно-плазменной обработки) / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, Л. В. Парфенов. Зарег. 05.12.2007.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610952. Программа дистанционного управления источниками питания Advanced Energy типа MDX II (MDX Control Panel) / Е. В. Парфенов, А. Л. Ерохин, А. Маттьюз. Зарег. 22.02.2008.

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615514. Программа управления генератором сигналов для импедансной спектроскопии процесса электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, В. Р. Мукаева, А. О. Тимофеев. Зарег. 27.08.2010.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011612724. Программа динамического спектрального анализа для процесса электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, С. А. Куклина, Р. Р. Невьянцева. Зарег. 06.04.2011.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616984. Программа анализа динамики технологических параметров процесса электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, С. А. Куклина, А. Л. Ерохин. За-рег. 08.09.2011.

***Статьи в сборниках научных трудов:***

33. Применение нейронных сетей при управлении процессом электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, С. А. Горбатков, Р. Р. Невьянцева, Д. А. Сосновский // Управление и информационные технологии: сб. тр. Всерос. науч. конф. Т. 1. СПб.: Изд. ЛЭТИ, 2003. С. 258–261.

34. Статистическая обработка сигналов для управления процессом электролитно-плазменной обработки / E. V. Parfenov, R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbatkov // System Identification and Control Problems: Proc. of Int. Conf. “SICPRO’05”. Moscow: V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, 2005. P. 998–1004. (Опубл. на англ. языке)

35. Исследование спектральной плотности сигнала тока при электролитно-плазменном удалении различных покрытий / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, Д. А. Серета, А. А. Быбин // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей: матер. II междунар. науч.-техн. конф. Кострома: КГУ; М.: МАТИ, 2007. С. 265–270.

36. Метод частотных характеристик для моделирования процесса плазменно-электролитического оксидирования / A. Yerokhin, E. V. Parfenov, A. Matthews // Mathematical Modelling and Computer Simulation of Materials Technologies: Proc. of 5<sup>th</sup> Intl Conf. “MMT-2008”, Israel, Samaria: Ariel University, 2008. P. 4-12–4-18. (Опубл. на англ. языке)

37. Решение полевой задачи распределения электрического потенциала при электролитно-плазменной обработке / Е. В. Парфенов, С. А. Горбатков, Р. Р. Невьянцева // Электрические методы обработки материалов: сб. науч. тр. 5-й междунар. конф. и симпозиума, посв. 100-летию со дня рожд. акад. Б. Р. Лазаренко. Кишинев: Изд. Elan Inc. SRL, 2010. С. 245.

38. Анализ энергоемкости процессов ЭПО / Е. В. Парфенов, В. Р. Мукаева, Р. Р. Невьянцева // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: сб. ст. Всерос. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 186–188.

39. Способы извлечения информации о состоянии поверхности в ходе процессов электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей: сб. тр. III междунар. науч.-техн. конф. Кострома: КГУ им. Некрасова, 2010. С. 277–283.

40. Управление технологическими процессами электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов // Мавлютовские чтения: Рос. науч.-практ. конф., посв. 85-летию со дня рожд. член-корр. РАН Р. Р. Мавлютова: сб. ст. в 5 т. Т. 5. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 127–131.

Соискатель



Е. В. Парфенов