

На правах рукописи



МУКАЕВА Вета Робертовна

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ ПО ИМПЕДАНСНЫМ СПЕКТРАМ**

Специальность:

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

Уфа – 2014

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

Научный руководитель: д-р техн. наук, доц.
ПАРФЕНОВ Евгений Владимирович

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, проф.
ЛЮДИН Валерий Борисович
ФГБОУ ВПО «Российский государственный
аграрный заочный университет»,
профессор кафедры информационных
и электротехнических систем и технологий

канд. техн. наук, доц.
КИРЮШИН Олег Валерьевич
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
доцент кафедры автоматизации
технологических процессов и производств

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский
государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского»

Защита диссертации состоится «06» июня 2014 г. в 12⁰⁰ час.
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
на базе Уфимского государственного авиационного технического университета
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«Уфимский государственный авиационный технический университет»
и на сайте <http://www.ugatu.ac.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

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



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП) широко применяется при подготовке поверхности ответственных деталей энергомашиностроения из нержавеющей сталей перед нанесением защитных вакуумно-плазменных покрытий. Технологический процесс ЭПП отвечает современным экологическим требованиям и позволяет обрабатывать поверхности металлов с высокой производительностью.

Перед машиностроением остро стоит проблема повышения экологичности и производительности технологических процессов, позволяющих качественно модифицировать поверхности металлов. Применение технологического процесса ЭПП позволяет решать эту проблему. Для обеспечения соответствия результатов обработки современным требованиям качества необходима разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) ЭПП с контуром обратной связи для контроля состояния поверхностного слоя, обеспечивающей получение заданной шероховатости поверхности. Процесс ЭПП характеризуется существенной сложностью и нелинейностью, так как на границе раздела «электролит – обрабатываемая поверхность» образуется парогазовая оболочка, в которой протекают электроразрядные, электрохимические, плазмохимические, металлургические и гидродинамические процессы, интенсивно модифицирующие поверхностный слой. Недостаточно разработана математическая модель процесса как объекта управления и не формализованы зависимости, по которым можно контролировать состояние поверхности в ходе ЭПП для обеспечения точности и воспроизводимости обработки, а также энерго- и ресурсосбережения.

Одним из путей получения информации является исследование импедансных спектров процесса ЭПП методом гармонического анализа в режиме малого сигнала. Параметры частотных откликов парогазовой оболочки могут быть информативными показателями процессов, протекающих в прианодном слое, и отражать свойства поверхности.

Степень разработанности темы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач проведен анализ работ ученых, внесших значительный вклад в изучение объекта управления. Известны разработки Н. А. Амирхановой, В. В. Баковца, П. Н. Белкина, А. М. Борисова, С. В. Гнеденкова, А. Л. Ерохина, И. С. Куликова, А. И. Мамаева, А. Матьюза, П. Скелдона, А. М. Смыслова, Л. А. Снежко, И. В. Суминова, Л. А. Ушомирской, А. В. Эпельфельда и др., посвященные исследованиям электролитно-плазменных процессов. Методология построения автоматизированных систем управления сложными технологическими процессами, такими как, электролитно-плазменная, электроэрозионная, электрохимическая размерная обработка и других с использованием диагностики неконтролируемых переменных объекта управления рассматриваются в работах В. В. Атрощенко, В. Н. Борикова,

С. А. Горбаткова, А. Н. Зайцева, В. Ц. Зориктуева, В. А. Мамаевой, А. Г. Лютова, В. Б. Людина, Е. В. Парфенова, М. Ю. Сарилова, и др.

Цель работы

Снижение энергоемкости и повышение качества обработки для процесса электролитно-плазменного полирования за счет разработки метода оптимального управления на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам.

Задачи исследования

1. Экспериментально исследовать шероховатость поверхности, толщину съема поверхностного слоя и импедансные спектры в ходе процесса электролитно-плазменного полирования, как характеристики объекта управления.

2. Разработать модель процесса электролитно-плазменного полирования как объекта управления.

3. Разработать метод оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам.

4. Разработать и внедрить аппаратно-программный комплекс АСУ ТП, реализующий метод оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам, оценить эффективность предложенного метода.

Научная новизна работы

1. Новизна результатов экспериментальных исследований объекта управления заключается в установлении взаимосвязей, отражающих закономерности изменения свойств поверхностного слоя и импедансных спектров процесса ЭПП в зависимости от технологических параметров (напряжения на электролизере, температуры электролита, длительности обработки и начальной шероховатости), *отличающихся тем, что* технологические параметры рассмотрены как управляющие воздействия и начальные условия объекта управления, *что позволяет* формализовать модель объекта управления и обосновать метод управления процессом ЭПП.

2. Новизна разработанной модели объекта управления заключается в установлении структуры из типовых динамических звеньев с переменными параметрами (апериодического звена первого порядка, интегрирующего и безынерционного звеньев), *отличающейся тем, что* постоянная времени и коэффициенты передачи звеньев рассчитываются с помощью радиально-базисной нейронной сети по начальным условиям и управляющим воздействиям, *что позволяет* поставить и решить задачу оптимального управления.

3. Новизна метода оптимального управления ТП ЭПП заключается в наличии алгоритма расчета оптимальной траектории управления напряжением по критерию энергопотребления при ограничении толщины съема поверхностного слоя и контура обратной связи, *отличающегося* контролем шероховатости поверхно-

сти и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам, *что позволяет* с минимальным энергопотреблением достигать требуемую шероховатость поверхности и своевременно останавливать процесс ЭПП.

4. Новизна аппаратно-программного комплекса АСУ ТП заключается в разработке опытных образцов оборудования и прототипов программного обеспечения для управления напряжением источника и проведения импедансной спектроскопии в условиях производства, *отличающихся* контуром контроля свойств поверхности и программой расчета оптимальной траектории управляющего напряжения, *что позволяет* реализовать метод оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Установленные взаимосвязи, отражающие закономерности изменения свойств поверхностного слоя и импедансных спектров в зависимости от технологических параметров процесса ЭПП *позволяют* формализовать модели процесса как объекта управления, и разрабатывать способы контроля шероховатости в ходе электролитно-плазменного полирования.

2. Модель процесса электролитно-плазменного полирования как объекта управления в виде структуры из типовых динамических звеньев с переменными параметрами *позволяет* рассчитывать траектории управления напряжением источника и температурой электролита и разрабатывать алгоритмы и системы оптимального управления процессом ЭПП.

3. Метод управления ТП ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам *позволяет* рассчитывать оптимальную траекторию управляющего напряжения на электролизере для минимизации энергопотребления и отклонения геометрических размеров деталей и определять момент окончания процесса при достижении требуемых свойств поверхности (патент РФ № 2475700, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2012616406).

4. Опытный образец аппаратно-программного комплекса АСУ ТП ЭПП *позволяет* проводить импедансную спектроскопию процесса в режиме малого сигнала, управлять напряжением в ходе процесса ЭПП по оптимальной траектории, обеспечивающей снижение энергоемкости процесса на 6...11 % и уменьшение толщины съема поверхностного слоя на 20...30 % и своевременно останавливать процесс ЭПП при достижении требуемой шероховатости поверхности (свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2010615514, № 2013618088).

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, планирования эксперимента, аппроксимации кривых, нейросетевого моделирования, линейного программирования, теории автоматического управления, корреляционного и статистического анализа, гармонического анализа, импедансной спектроскопии. При экспериментальном исследовании объекта управления

использовался профилографический метод измерения шероховатости поверхности, гравиметрический метод определения толщины съема поверхностного слоя, а также оптическая микроскопия топографии поверхности. Обработка экспериментальных данных и исследование нейросетевых моделей проводились на основе оригинальных программ для персональных ЭВМ, составленных с использованием пакетов *MATLAB* и *LabVIEW*.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального исследования шероховатости поверхности, толщины съема поверхностного слоя и импедансных спектров в ходе процесса электролитно-плазменного полирования, как характеристик объекта управления (*соответствуют п. 3 паспорта специальности*).

2. Модель процесса электролитно-плазменного полирования как объекта управления в виде структуры из типовых динамических звеньев с переменными параметрами (*соответствует п. 4 и п. 15 паспорта специальности*).

3. Метод оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам и регулирования управляющего напряжения по оптимальной траектории, рассчитанной методом линейного программирования (*соответствует п. 3 и п. 15 паспорта специальности*).

4. Результаты внедрения аппаратно-программного комплекса АСУ ТП, реализующего метод управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности, толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам и регулирования управляющего напряжения по оптимальной траектории (*соответствуют п. 10 и п. 18 паспорта специальности*).

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность полученных в диссертационной работе закономерностей и характеристик, достоверность результатов исследований основана на использовании общепринятых методов и методик планирования и проведения экспериментальных исследований, применением сертифицированных средств измерений, современных методов и эффективного программного обеспечения для анализа экспериментальных данных. Полученные результаты согласованы с известными теоретическими положениями. Корректно проведена статистическая обработка данных эксперимента. Достоверность разработанных способов контроля состояния поверхности подтверждена экспериментально.

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2010–2013), Международная научная конференция «Туполевские чтения» (Казань, 2008, 2010), Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2007–2013), Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2012–2014), Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Ин-

новации» (Новосибирск, 2009), XX Российская молодежная научная конференция, посв. 90-летию УрГУ им. А. М. Горького (Екатеринбург, 2010), конференция «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения» (Уфа, 2010).

Работа выполнена в рамках следующих программ научных исследований: договоров о создании (передаче) научно-технической продукции № АП-ТО-14-12-ХГ-490/48 от 09.06.2012 г., № АП-ТО-15-12-ХГ-929/48 от 29.06.2012 г. между ОАО «КумАПП» и ФГБОУ ВПО «УГАТУ»; гранта Лондонского Королевского общества на осуществление совместных научных исследований с Университетом Шеффилда № IE111315 (2012–2013).

Результаты работы используются в производстве на ОАО «Кумертауское авиационное производственное предприятие» и в учебном процессе в ФГБОУ ВПО «УГАТУ».

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в 20 печатных работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 1 статье в высокорейтинговом рецензируемом журнале, издаваемом за рубежом, 1 патенте РФ и 3 свидетельствах о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, включает 177 страниц текста, содержит 69 иллюстраций, 16 таблиц и библиографический список из 158 наименований. В приложениях приведены акты использования результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены результаты апробации и реализации, приведена структура и объем работы.

В первой главе проанализировано современное состояние и известные подходы к исследованиям в области автоматизации процесса электролитно-плазменного полирования. Показана актуальность решаемой задачи на основе анализа направлений научных исследований в области изучения процессов ЭПП и управления электротехнологическими процессами. Обоснована необходимость построения АСУ ТП ЭПП, в составе которых функционируют модули контроля параметров состояния поверхностного слоя по импедансным спектрам и оптимального регулирования напряжения на электролизере для достижения заданных свойств поверхностного слоя и снижения энергоемкости.

Проведен анализ зависимости свойств поверхностного слоя в ходе ЭПП и плотности тока от технологических параметров. Выявлены рабочие диапазоны значений технологических параметров, и показано, что для определения оптимального режима ЭПП, обеспечивающего минимальную энергоемкость процесса при достижении требуемого качества поверхности необходимо определить зависимости, учитывающие взаимные влияния технологических параметров и начальных свойств поверхности. Нелинейный характер изменения свойств поверхност-

ного слоя и плотности тока говорит о преимуществах обработки с оптимальным регулированием технологических параметров при определенных значениях заданных целевых свойств поверхностного слоя.

Установлено, что мониторинг процессов ЭПП возможен по электрическим характеристикам электролизера, оптическим характеристикам парогазовой оболочки с микроразрядами и эталонным математическим моделям. Вольтамперные характеристики электролизера позволяют определить рабочий участок ЭПП, соответствующий участку вольтамперной характеристики электролитно-плазменных процессов с отрицательным наклоном.

Рассмотрение подходов к диагностике состояния поверхности показывает, что наиболее перспективными являются способы, основанные на математических моделях, учитывающих технологические параметры процесса ЭПП и спектральных характеристиках электрических сигналов. Анализ информативных параметров, позволяющих контролировать свойства поверхностного слоя, показал, что вопросы активной идентификации методом импедансной спектроскопии недостаточно изучены для электролитно-плазменных процессов с парогазовой оболочкой. На перспективность данного метода указывают известные способы пассивной идентификации шероховатости поверхности, связанные с электрическими спектральными характеристиками. Следовательно, можно предположить, что активное воздействие на процесс ЭПП в определенных областях частот повысит точность спектральных способов идентификации шероховатости поверхности и позволит разработать новые способы контроля поверхностного слоя.

Проведен анализ в области систем управления процессом ЭПП и процессами электролитно-плазменной обработки. Проведена классификация автоматизированных систем управления и установок, используемых для реализации процесса ЭПП. Установлено, что для процесса ЭПП в настоящее время применяются автоматизированные системы управления со стабилизацией технологических параметров на субоптимальном уровне, определенном в ходе предварительной настройки, или с программным управлением режимами обработки. Однако подавляющее большинство рассмотренных систем не решают задачу контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя в ходе ЭПП и не имеют оптимального управления напряжением.

Во второй главе приведены результаты исследования характеристик процесса ЭПП как объекта управления.

Приведено описание экспериментальной установки, методика и результаты полнофакторного исследования электролитно-плазменного полирования образцов из стали 20Х13, с четырьмя факторами: напряжение на электролизере U , температура электролита T , начальная шероховатость поверхности Ra_0 и длительность обработки t . В ходе обработки регистрировались мгновенные значения тока и напряжения, рассчитывалась средняя по площади анода плотность тока δ . После ЭПП измерялась шероховатость поверхности образцов Ra и рассчитывалась толщина съема поверхностного слоя h .

В результате анализа вида переходных характеристик переменных Ra и Δh установлено, что они могут быть аппроксимированы следующими параметрическими зависимостями от времени t :

$$Ra = A \cdot \exp(-t / \tau) + C, \quad (1)$$

$$h = v \cdot t, \quad (2)$$

где A – предельное снижение шероховатости, τ – постоянная времени, C – предельно достижимая шероховатость; t – длительность обработки; v – скорость съема поверхностного слоя. Установлено, что плотность тока δ незначимо изменяется в ходе обработки, а время ее установления на 2–3 порядка меньше постоянной времени τ , поэтому в рассматриваемом масштабе времени с шагом моделирования в 1 минуту, инерционностью переменной δ можно пренебречь.

В соответствии полученными переходными характеристиками, динамика переменной Ra соответствует аperiodическому звену первого порядка, h – интегрирующему звену, δ – безынерционному звену.

С использованием графической среды программирования Simulink построена модель процесса ЭПП, как объекта управления (рисунок 1), описывающая переходные характеристики выходных переменных объекта управления, как реакцию на ступенчатое воздействие включения установки ЭПП на напряжение U , температуру электролита T , с начальными условиями Ra_0 . На рисунках 2, а и 2, б приведены результаты моделирования выходных переменных объекта управления Ra и h . На рисунках 2, в и 3 показаны закономерности изменения параметров A , C , τ , v , δ передаточных функций динамических звеньев, полученные с использованием нейросетевой модели НС1, в зависимости от U , T , Ra_0 .

Приведены результаты исследования импедансных спектров электролизера ЭПП. Оценка импедансных спектров проводилась в режиме малого сигнала.

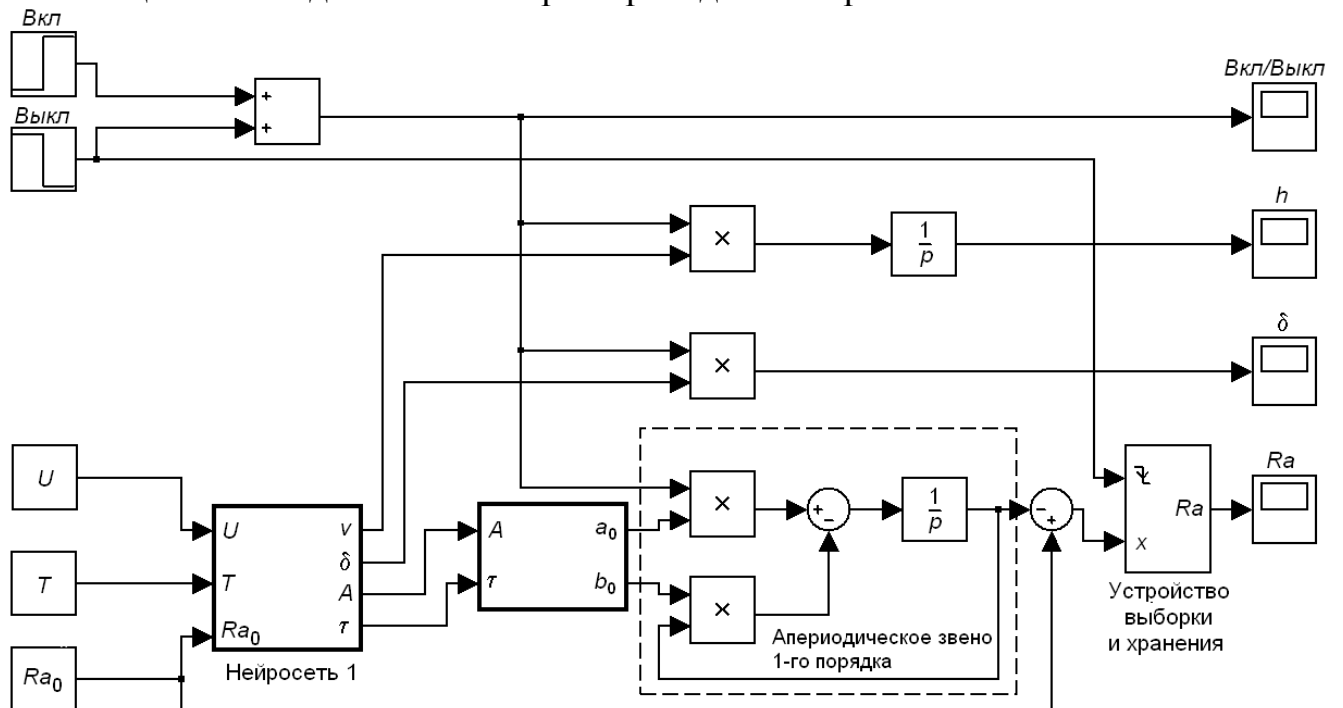


Рисунок 1 – Функциональная схема модели процесса ЭПП как объекта управления

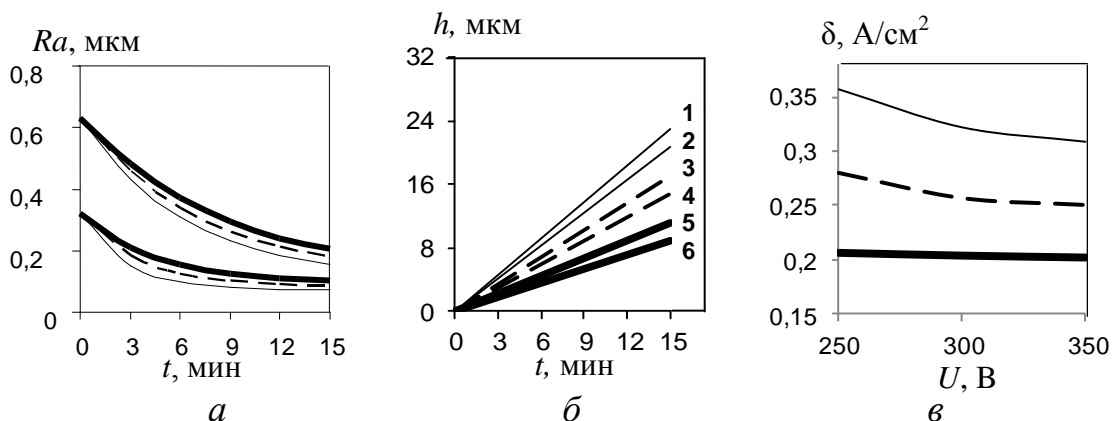


Рисунок 2 – Изменение шероховатости поверхности от времени при температуре 70(—), 80(--), 90(—) °С и напряжении 300 В для исходной шероховатости Ra 0,32 и 0,63 мкм (а); изменение толщины поверхностного слоя от длительности обработки при температуре 70 (—), 80 (--) и 90 (—) °С и напряжении 300 В; прямые 1, 3, 5 соответствуют $Ra_0 = 0,32$ мкм; 2, 4, 6 – $Ra_0 = 0,63$ мкм (б); зависимость плотности тока от напряжения при температуре 70(—), 80(--), 90(—) °С (в)

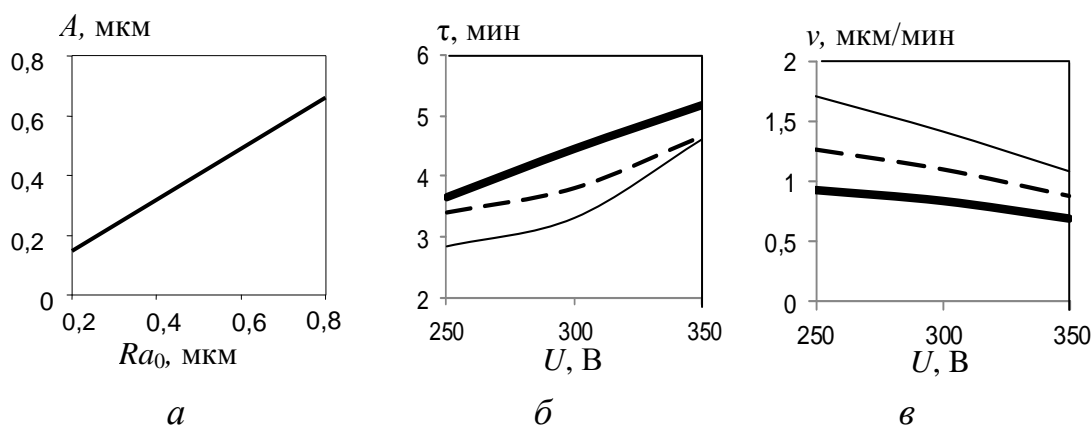


Рисунок 3 – Зависимость предельного снижения шероховатости A , мкм от начальной шероховатости Ra_0 (а); зависимость постоянной времени τ снижения шероховатости поверхности от напряжения при температуре 70(—), 80(--), 90(—) °С и $Ra_0 = 0,32$ мкм (б); зависимость скорости съема поверхностного слоя v от напряжения при температуре 70(—), 80(--), 90(—) °С и $Ra_0 = 0,32$ мкм (в)

При исследовании на электроды подавалась сумма напряжений технологического источника постоянного напряжения 225...325 В и источника однополярных прямоугольных импульсов с амплитудой 50 В, с дискретной частотой следования f_m в диапазоне от 20 до 2000 Гц. В результате цифровой обработки сигналов напряжения $u[\eta]$ и тока $i[\eta]$, где η – номер отсчета дискретного сигнала с общим числом отсчетов N , для каждого отсчета t_n дискретного времени n по формулам (6) и (7) были рассчитаны оценки спектров тока и напряжения с помощью быстрого преобразования Фурье, из которых были выделены эквивалентные синусоиды на частотах f_m . Для проверки эквивалентные синусоиды также выделялись с помощью полосовых фильтров.

$$\underline{I}(t_n, f_m) = \sum_{\eta=1}^H i[\eta] e^{(-2\pi j \cdot (m-1) \cdot (\eta-1)) / H} \quad (6)$$

$$\underline{U}(t_n, f_m) = \sum_{\eta=1}^H u[\eta] e^{(-2\pi j \cdot (m-1) \cdot (\eta-1)) / H} \quad (7)$$

$$\underline{G}(t_n, f_m) = \frac{\underline{I}(t_n, f_m)}{\underline{U}(t_n, f_m)}, m = 1, 2 \dots M. \quad (8)$$

В качестве оценок импедансных спектров были приняты: удельная проводимость $G(t_n, f_m)$ и разность фаз $\varphi(t_n, f_m)$ между эквивалентными синусоидами тока и напряжения, фактически представляющие собой составляющие оценки комплексной частотной характеристики:

$$\underline{G}(t_n, f_m) = G(t_n, f_m) \cdot \exp(j\varphi(t_n, f_m)). \quad (9)$$

Примеры оценок импедансных спектров процесса ЭПП приведены на рисунке 4.

В третьей главе рассмотрена разработка метода оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам.

Предложенный метод включает в себя:

- 1) алгоритм расчета траектории оптимального управления напряжением U по эталонным моделям объекта управления для достижения целевой шероховатости при заданных начальных условиях и ограничениях;
- 2) способы измерения шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя в ходе процесса ЭПП;
- 3) алгоритм управления процессом ЭПП по достижению требуемой шероховатости поверхности.

Разработан алгоритм расчета траектории изменения напряжения U для достижения целевой шероховатости поверхности $Ra_{ц}$, не превышая допустимую толщину съема поверхностного слоя $h_{д}$, при минимальном энергопотреблении. При расчете используются эталонные модели объекта управления, описанные во второй главе, и методы линейного математического программирования.

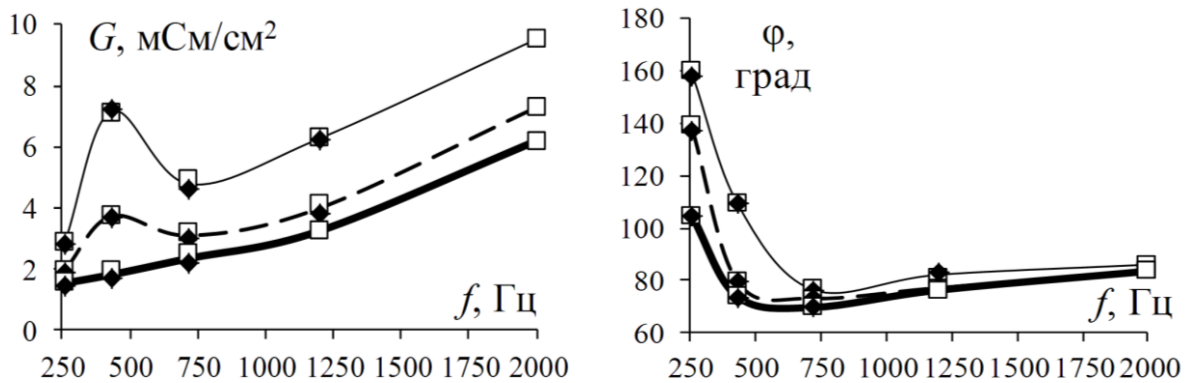


Рисунок 4 – Оценки импедансных спектров процесса ЭПП при температуре 70 °С (---), 80 °С (—), 90 °С (—) и напряжении 300 В, рассчитанные с применением полосовых фильтров (□) и преобразования Фурье (◆)

Учитывая инерционность изменения температуры ванны, входная переменная T фиксируется на постоянном уровне.

Траектория оптимального управления напряжением $U_k[n]$ выбирается из K траекторий, так, чтобы обеспечить минимальное энергопотребление Q_k :

$$U_k[n]: \{(Q_k \rightarrow \min) \cap (Ra_k < Ra_{\text{ц}}) \cap (h_k < h_{\text{д}})\}, \quad (10)$$

где k – номер траектории управляющего напряжения.

Для каждого $k = 1, 2, \dots, K$ рассчитывается траектория $U_k[n]$, соответствующая минимуму целевой функции линейного математического программирования $F_k[n]$ на каждом шаге дискретного времени n :

$$U_k[n]: \{F_k[n] \rightarrow \min\}. \quad (11)$$

Целевая функции линейного программирования F имеет вид:

$$F_k[n] = C_1 Ra[n] + C_{2k} h[n], \quad (12)$$

где текущие значения $Ra_k[n]$ и $h_k[n]$ определяются с помощью модели объекта управления:

$$(Ra_k[n], h_k[n]) = f_1(Ra_k[n-1], h_k[n-1], U_k[n], Ra_0, T), \quad (13)$$

где коэффициент оптимизации $C_1=1$, а значение коэффициента оптимизации C_{2k} ищется в заданной области значений. Значения входных переменных и начальных условий лежат в диапазонах: $U = 250 \dots 350$ В, $T = 70 \dots 90$ °С, $Ra_0 = 0,32 \dots 0,63$ мкм.

Разработаны два способа косвенного измерения шероховатости поверхности в ходе ЭПП:

1) Измеряют значения плотности тока δ и напряжения на электролизере U . Шероховатость поверхности в ходе обработки определяют по формуле:

$$Ra = C + (Ra_0 - C) \cdot \exp(-t / (\tau_0 + b_1 \delta + b_2 U)), \quad (14)$$

где τ_0 – среднее значение постоянной времени; b_1, b_2 – коэффициенты пропорциональности, зависящие от материала детали, природы и концентрации электролита. Величины τ_0, b_1 и b_2 вычисляют по семейству тарировочных кривых зависимости постоянной времени снижения шероховатости от напряжения U и плотности тока δ . На данный способ получен патент РФ № 2475700.

2) К электролизеру прикладывают тестовые диагностирующие сигналы напряжения переменной частоты. Измеряют мгновенные значения тока i и напряжения u и рассчитывают оценки модуля и аргумента импедансных спектров в диапазоне частот $f = 250 \dots 2000$ Гц, которые подают на вход предварительно обученной обобщенно-регрессионной радиально базисной нейронной сети НС2, которая вычисляет значения шероховатости Ra и h по оценкам импедансных спектров:

$$(Ra, h) = f_2(G_1, \dots, G_M, \varphi_1, \dots, \varphi_M), \quad (15)$$

где $m = 1 \dots 5$ соответствует информативным частотам импедансного спектра.

По достижению требуемой шероховатости поверхности оператор получает соответствующий сигнал на дисплее, что является рекомендацией к останову технологического процесса. По выбору оператора останов также может проводиться

автоматически. Управление технологическим процессом ЭПП согласно разработанному методу осуществляется по алгоритму, представленному на рисунке 5.

Четвертая глава посвящена разработке и внедрению элементов аппаратно-программного комплекса АСУ ТП, реализующего предложенный метод управления процессом ЭПП.

Разработаны аппаратные и программные средства для проведения импедансной спектроскопии и управления процессом ЭПП, которые выполняют задачи: расчета траектории оптимального управления напряжением; активного воздействия на процесс сканирующими импульсами; сбора, обработки данных и расчета импедансных спектров; обеспечения возможности оператора управлять технологическим процессом.

На рисунке 6 приведена структурная схема автоматизированной системы оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам. Для реализации предлагаемого метода оптимального управления было разработано аппаратно-программное обеспечение, которое представляет следующие блоки структурной схемы:

- Блок расчета траектории напряжения, выполняющий свою функцию до начала технологического процесса, на этапе планирования хода обработки.
- Импульсный блок спектральной диагностики ИБСД-20, который обеспечивает воздействие на технологический процесс ЭПП сканирующими импульсами переменной частоты.
- Блок расчета импедансного спектра и блок расчета Ra и h , которые входят в состав контура обратной связи для контроля Ra и информирования оператора о ходе процесса обработки.

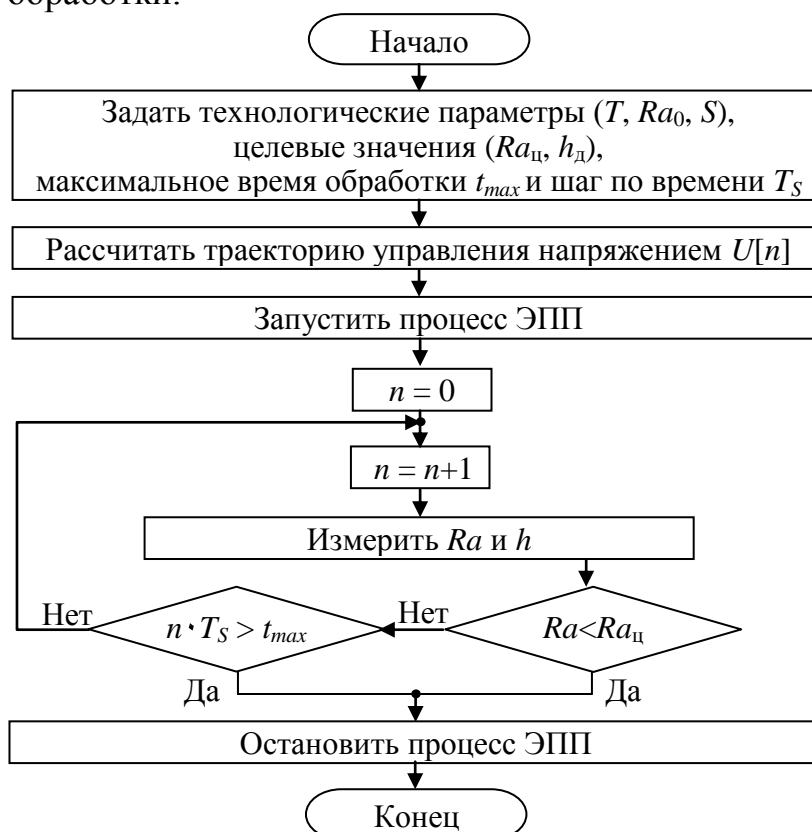


Рисунок 5 – Алгоритм управления технологическим процессом ЭПП

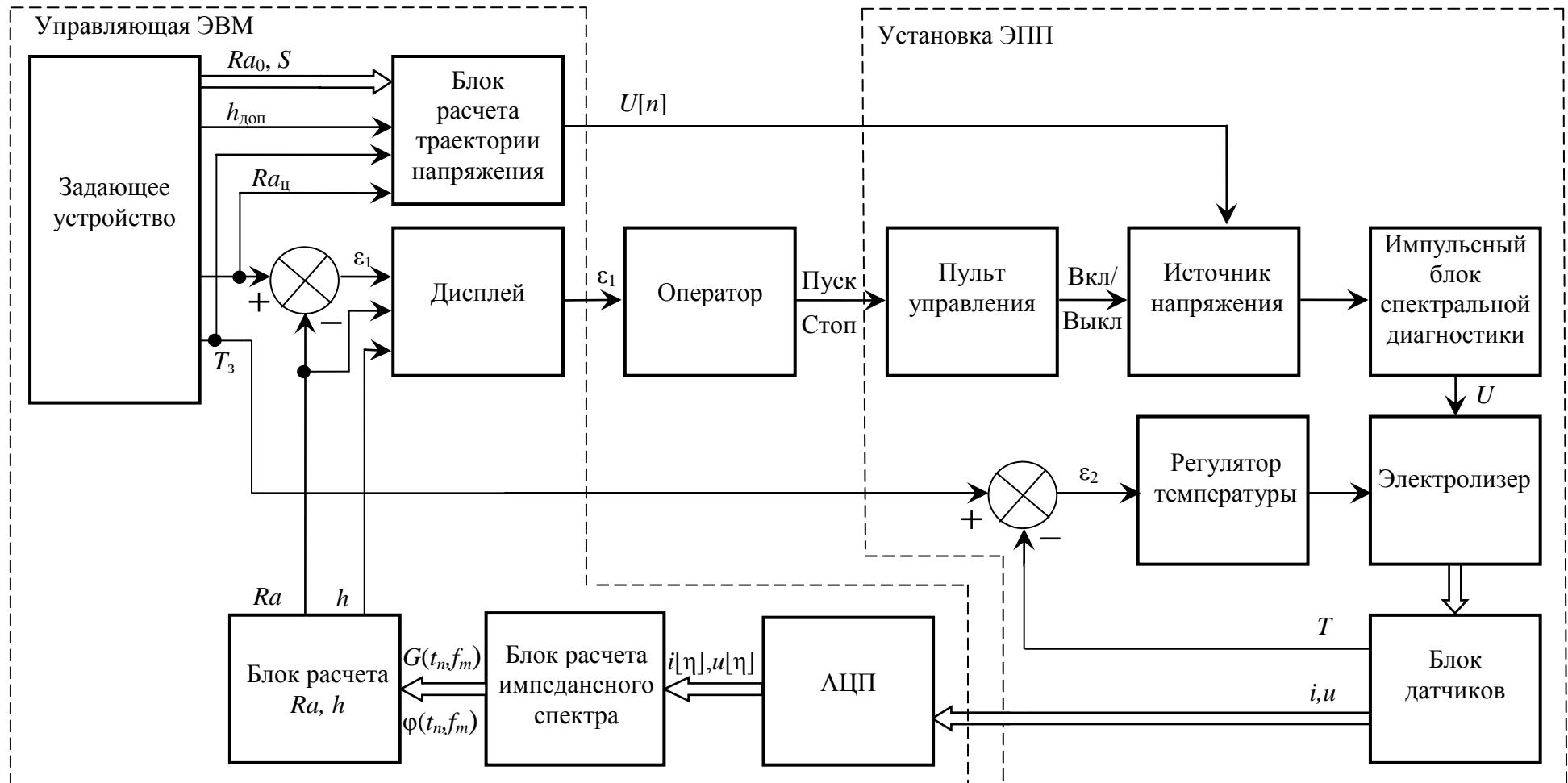


Рисунок 6 – Структурная схема автоматизированной системы оптимального управления ТП ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам

Измерение мгновенных значений тока, напряжения и температуры производится блоком датчиков. Сбор данных и их аналого-цифровое преобразование осуществляется с помощью платы NI PCI-6230. Обработку данных и расчет импедансных спектров выполняет прототип программного комплекса, реализованный в среде программирования LabVIEW.

Разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора на базе промышленного компьютера и программируемых источников питания TDK-Lambda и опытного образца импульсного блока спектральной диагностики. АРМ оператора находится в закрытом от атмосферы гальванического цеха помещении. Основные функции оператор может осуществлять также с помощью пульта управления в коррозионностойком исполнении, расположенном вблизи электролизера.

На рисунке 7 показан пример, показывающий эффективность оптимального управления напряжением по сравнению с поддержанием напряжения на постоянном субоптимальном уровне $U=300$ В. Расчет проводился для детали с $Ra_0 = 0,63$ мкм и $T = 80$ °С с целью достижения $Ra_{ц} = 0,15$ мкм и обеспечения $h_{д} < 18$ мкм. Благодаря рассчитанной траектории оптимального управления достигнуты целевые значения с выигрышем по h в 14 %, в то время как при постоянных значениях $U = 300$ В и $T = 80$ °С их достигнуть невозможно.

Показано, что по сравнению с ТП ЭПП без управления, применение программ оптимального управления позволяет достигнуть выигрыша ε по энергоемкости Q или по толщине съема поверхностного слоя h в зависимости от начального условия Ra_0 , температуры T , целевой шероховатости $Ra_{ц}$ и ограничения $h_{д}$.

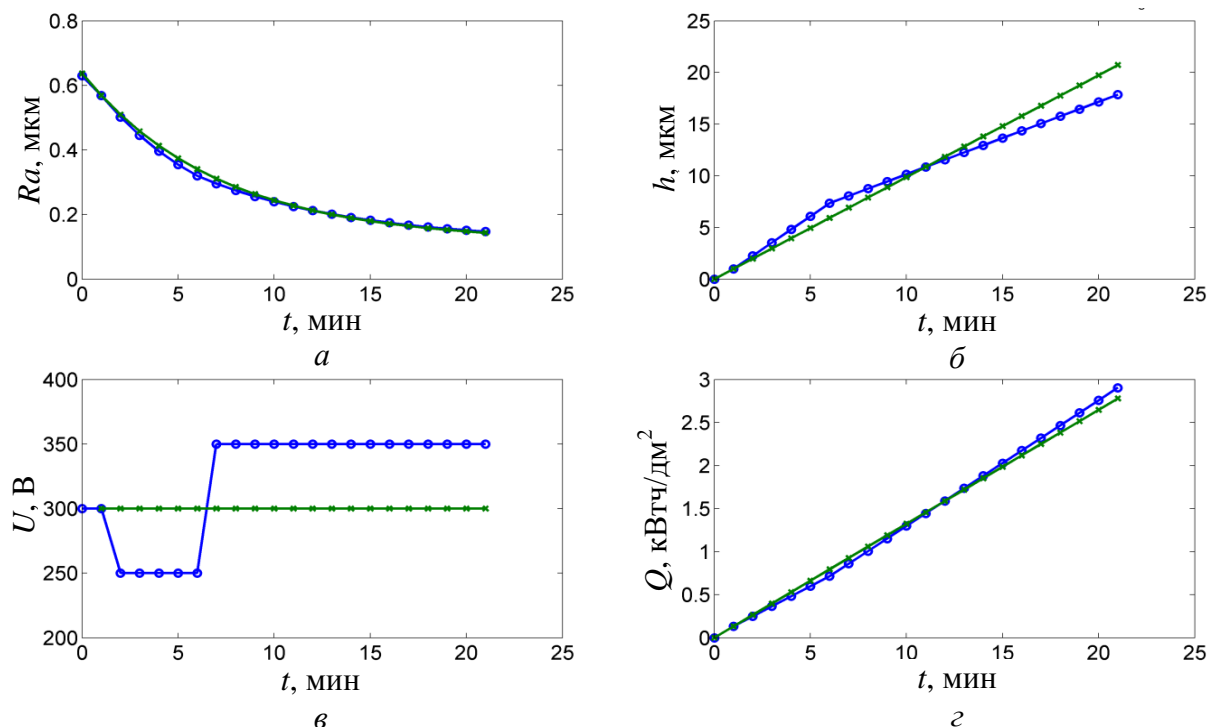


Рисунок 7 – Сравнение траекторий управляющего напряжения U (в) и соответствующие изменения величин Ra (а); h (б); Q (г):

(—x—) – напряжение поддерживается постоянным на субоптимальном уровне,
 (—o—) – траектория оптимального управления напряжением

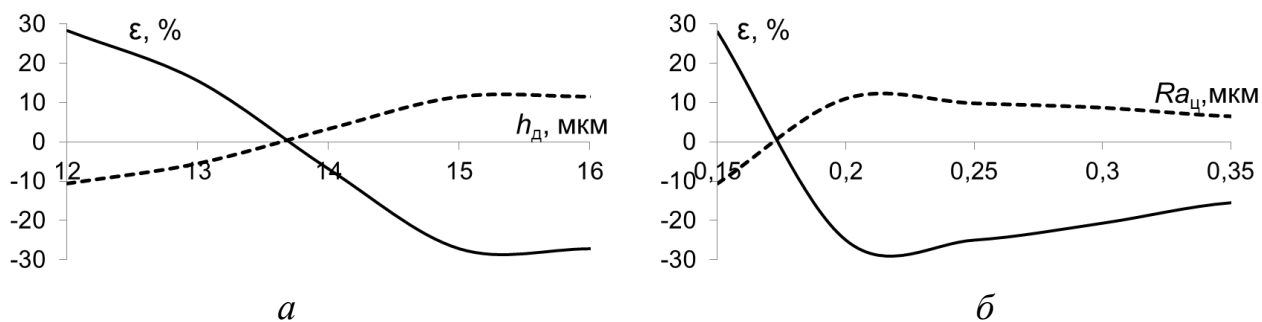


Рисунок 8 – Выигрыш по энергоёмкости (---) и по толщине съема поверхностного слоя (—) в зависимости от целевых свойств поверхности для $T = 70$ °С, $Ra_0 = 0,5$ мкм и $Ra_{ц} = 0,15$ мкм (а), $h_d = 12$ мкм (б)

Из рисунка 8 следует, что ужесточение требований к допустимой толщине съема поверхностного слоя h_d или к целевой шероховатости $Ra_{ц}$ приводит к повышению энергоёмкости за счет необходимости выполнения ограничения по h , что недостижимо без управления.

Таким образом, разработанный метод оптимального управления на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам позволяет снизить энергоёмкость и уменьшить изменение геометрических размеров деталей за счет оптимизации траектории изменения управляющего напряжения и своевременного останова процесса обработки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе экспериментальных исследований объекта управления установлены взаимосвязи, отражающие закономерности изменения свойств поверхностного слоя и импедансных спектров процесса ЭПП в зависимости от технологических параметров (напряжения на электролизере, температуры электролита, длительности обработки и начальной шероховатости), что позволяет выявить переходные характеристики процесса ЭПП, формализовать его модель как объекта управления, предложить способы контроля шероховатости и обосновать метод оптимального управления.

2. Разработана модель объекта управления в виде структуры из типовых динамических звеньев (апериодического звена первого порядка, интегрирующего и безынерционного звеньев), с переменными параметрами (постоянная времени и коэффициенты передачи звеньев), рассчитываемыми с помощью радиально-базисной нейронной сети по начальным условиям и управляющим воздействиям, что позволяет поставить и решить задачу оптимального управления процессом электролитно-плазменного полирования.

3. Разработан метод оптимального управления процессом ЭПП, заключающийся в изменении напряжения на электролизере по оптимальной траектории, рассчитанной по модели объекта управления для достижения требуемой шероховатости поверхности с минимальным энергопотреблением, при ограничении по толщине съема поверхностного слоя, стабилизации температуры электролита на постоянном уровне и своевременном останове процесса за счет контроля свойств поверхности по импедансным спектрам, реализуемом либо по запатентованному

способу на основе модели объекта управления, либо с помощью диагностической радиально-базисной нейросетевой модели.

4. Разработан аппаратно-программный комплекс АСУ ТП, реализующий метод оптимального управления процессом ЭПП на основе изменения напряжения на электролизере по оптимальной траектории и контроля шероховатости поверхности, толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам, обеспечивающий снижение энергоемкости процесса на 6...11 % и уменьшение толщины съема поверхностного слоя на 20...30 % при достижении требуемой шероховатости поверхности. Опытные образцы элементов АСУ ТП внедрены в производство на ОАО «КумАПП» и в учебный процесс в ФГБОУ ВПО «УГАТУ».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. Математическое моделирование процесса электролитно-плазменного полирования / В. Р. Мукаева, Е. В. Парфенов // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 6. С. 67–73.

Статья в рецензируемом журнале, издаваемом за рубежом:

4. Количественная оценка линейности системы для импедансной спектроскопии в ходе плазменно-электролитического оксидирования / A.Yerokhin, E. V. Parfenov, C. J. Liang, V. R. Mukaeva, A. Matthews // Electrochemistry Communications. 2013. Vol. 27. P. 137–140. (Опубл. на англ. яз.)

Патент:

5. Патент 2475700 (РФ). МПК G 01 В 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности в процессе электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, В. Р. Мукаева, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин. Опубл. 20.02.2013. БИ № 5.

Программы для ЭВМ:

6. Свид. о гос. рег. 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.

7. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2012616406. Программный комплекс для электролитно-плазменной импедансной спектроскопии FRAnalysis / Е. В. Парфенов, А. Л. Ерохин, В. Р. Мукаева. Зарег. 13.07.2012.

8. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2013618088. Программа микроконтроллера для спектральной диагностики и управления процессами электро-

литно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, М. В. Горбатков, В. Р. Мукаева. Зарег. 29.09.2013.

Статьи в сборниках научных трудов:

9. Аппаратное и программное обеспечение активной идентификации процесса электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, В. Р. Мукаева // Гагаринские чтения: Тез. докл. междунар. молодежн. науч. конф. М.: МАТИ, 2008. Т. 3. С. 160–161.

10. Автоматизированная установка для исследования частотных характеристик процессов электролитно-плазменной обработки / В. Р. Мукаева, Е. В. Парфенов // Туполевские чтения: Тез. докл. междунар. молодежн. науч. конф. Казань: КГТУ, 2008. Т. 3. С. 328–329.

11. Программный анализ данных при измерении частотных характеристик процесса электролитно-плазменной обработки / В. Р. Мукаева, Е. В. Парфенов, А. О. Тимофеев // Наука. Технологии. Инновации: Тез. докл. всеросс. молодежн. науч. конф. Новосибирск: НГТУ, 2009. Т. 1. С. 211–213.

12. Анализ энергоемкости процессов электролитно-плазменной обработки / Парфенов Е. В., Мукаева В. Р., Невьянцева Р. Р. // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: Тез. докл. всеросс. молодежн. науч. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 186–188.

13. Динамическая математическая модель процесса электролитно-плазменного полирования / В. Р. Мукаева // Мавлютовские чтения: Тез. докл. всеросс. молодежн. науч. конф. Уфа: УГАТУ, 2011. Т. 3. С. 82–83.

14. Аппаратно-программный комплекс для спектральной диагностики процессов электролитно-плазменной обработки / А. О. Тимофеев, В. Р. Мукаева, М. В. Горбатков, С. А. Куклина // Актуальные проблемы в науке и технике. Т. 2: Сб. ст. 7-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 51–54.

15. Импульсный блок спектральной диагностики электролитно-плазменных и электрохимических процессов / М. В. Горбатков, Е. В. Парфенов, В. Р. Мукаева, А. Л. Ерохин // Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии. Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей: Тез. докл. междунар. молодежн. науч. конф. Иваново: ИХР РАН, 2013. С. 95.

16. Исследование частотных характеристик процессов электролитно-плазменной обработки / В. Р. Мукаева // Актуальные проблемы в науке и технике. Сборник статей 8-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2013. Т. 2. С. 198–201.

17. Моделирование процесса электролитно-плазменного полирования как объекта управления с использованием пакета SIMULINK / В. Р. Мукаева, М. В. Горбатков // Актуальные проблемы в науке и технике. Сборник статей 8-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2014. Т. 2. С. 162–165.

Соискатель

 В. Р. Мукаева

МУКАЕВА Вета Робертовна

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ ПО ИМПЕДАНСНЫМ СПЕКТРАМ

Специальность 05.13.06

Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 27.03.2014. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.

Усл. печ.л.1,0. Уч.-изд. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 221

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Центр оперативной полиграфии

450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12