

На правах рукописи



**СОЛОВЬЕВ ДЕНИС СЕРГЕЕВИЧ**

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ С ЦИКЛИЧЕСКИ ВКЛЮЧАЕМЫМИ  
АНОДНЫМИ СЕКЦИЯМИ**

Специальность 05.13.06  
Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (по отраслям)

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

Тамбов – 2014

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*Литовка Юрий Владимирович*

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и управления» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»  
*Большаков Александр Афанасьевич*

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»  
*Глазков Виктор Петрович*

**Ведущая организация** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится 21 ноября 2014 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, Большой зал.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ» и на сайте <http://www.tstu.ru>.

Автореферат разослан \_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



*Александр Алексеевич Чуриков*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Гальванические процессы широко используются в промышленности с целью нанесения защитных металлических покрытий на изготавливаемые изделия. Основными качественными показателями гальванических покрытий являются: равномерность распределения толщины покрытия по поверхности изделия, микротвёрдость покрытия, износостойкость, пористость и прочность сцепления покрытия с металлом основы. Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при проведении гальванических процессов, является проблема получения равномерного покрытия на поверхности изделий сложной геометрической формы. Неравномерность – явление негативное, так как оно приводит к дополнительному расходу электроэнергии и металла покрытия. Возможности серийного оборудования, используемого в настоящее время для проведения гальванических процессов, практически исчерпаны с точки зрения снижения неравномерности распределения толщины покрытия. Вместе с тем, существующие способы управления гальваническими процессами (регулирование температуры, уровня и величины рН электролита и т.д.) остаются слабо автоматизированными с большой долей ручного труда и ограниченными функционально-техническими возможностями. Следовательно, дальнейший прогресс в этой области связан с оптимизацией и автоматизацией существующих процессов, модернизацией, совершенствованием технологии, использованием перспективного оборудования, такого, как гальванические ванны со многими анодами.

Основные исследования в области разработки математических моделей гальванических процессов, алгоритмов управления и автоматизации такого оборудования проводились отечественными учеными А.А. Капустиним, Н.Д. Кошевым, А.Н. Алексеевым, А.Б. Манукяном, В.Т. Ивановым, Ю.В. Литовка и И.В. Миловановым. Среди зарубежных работ стоит отметить труды С. Wagner, M.G. Pavlović, H. Lavelaine de Maubeuge, H.P.E. Helle, J. Kronsbein и J.W.Dini. Однако исследования в данной области проводились разрозненно друг от друга, многие статьи носят обзорный характер. Кроме того, работам присущ ряд общих недостатков, как в аппаратной реализации автоматизированных систем управления, так и в создании математических моделей таких гальванических процессов.

Автором предлагается новый технологический подход к использованию многоанодных ванн, работающих в режиме циклического включения анодных секций по принципу растровой развертки. Преимуществом представленного решения является относительная простота технической реализации и низкая стоимость дополнительного оборудования. В таком случае снижение неравномерности распределения толщины покрытия повлечёт за собой экономию металла покрытия, а используемое оборудование позволит уменьшить потребляемую электроэнергию, затрачиваемую

мую на гальванический процесс. В свою очередь, такое оборудование невозможно эффективно эксплуатировать без разработки методов, алгоритмов и систем управления ввиду чрезвычайной сложности связи управляющих воздействий с качественными показателями гальванических покрытий.

В этой связи весьма **актуальными** представляются вопросы, связанные с разработкой методов оптимального управления гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями, а также математического моделирования таких процессов.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке гранта «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках выполнения программы «У.М.Н.И.К.» гос.контракты на НИОКР: № 9576p/14219 от 01.08.2011г. «Разработка системы управления гальванической ванной с циклическим включением анодных секций»; №10741p/16955 от 01.08.2012г. «Разработка программного комплекса для системы управления гальванической ванной с циклическим включением анодных секций».

**Целью работы** является снижение неравномерности распределения толщины покрытия за счёт оптимального управления гальваническим процессом с циклически включаемыми анодными секциями.

В соответствии с целью работы были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1) исследование класса гальванических процессов, протекающих в ваннах со многими анодами, как объектов моделирования и автоматизации, выявление их недостатков;

2) разработка на основе проведенного анализа нового способа нанесения гальванического покрытия в ванне, функционирующей в режиме циклического включения анодных секций.

3) постановка задачи оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия;

4) анализ математической модели гальванического процесса, описывающей режим циклического включения анодов, и разработка алгоритма ее решения;

5) анализ поставленной задачи оптимального управления гальваническим процессом, выбор метода её решения и разработка алгоритмической и программной реализации метода оптимального управления;

6) разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом нанесения гальванических покрытий в ванне с циклически включаемыми анодными секциями.

**Объектом исследования** являются гальванические процессы в многоанодной ванне, функционирующей в режиме циклического включения анодных секций.

**Предметом исследования** являются методы оптимального управления гальваническими процессами, учитывающие режим циклического включения анодных секций.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы математического и геометрического моделирования, методы оптимизации, математической статистики, теории принятия решений, численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных.

**Научная новизна работы:**

1) поставлена задача оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия в многоанодной ванне, функционирующей в режиме циклического включения анодных секций, в соответствии с критериями неравномерности покрытия и продолжительности технологического процесса, отличающаяся использованием различных значений напряжения на независимых анодных секциях в качестве управляющего воздействия;

2) разработан алгоритм решения системы уравнений математической модели гальванического процесса в ванне со многими анодами, отличающийся тем, что учитывается режим циклического включения анодных секций;

3) разработан алгоритм решения задачи оптимального управления гальваническим процессом в многоанодной ванне, отличающийся учётом изменения концентрации компонентов электролита во время проведения процесса;

4) предложена методика выбора вида оптимального управления, отличающаяся использованием в качестве управляющих значений напряжения полиномы различной степени;

5) предложен метод определения оптимального количества анодных секций, отличающийся выбором размерности системы анодных секций в зависимости от величины прироста критерия оптимальности, содержащего в себе критерии неравномерности покрытия и продолжительности технологического процесса;

6) разработан алгоритм прогнозирования результатов оптимального управления по значениям оценок эксперта по каждому из критериев, отличающийся аппроксимацией частных критериев квадратичными функциями и поиском минимума полученного аддитивного одномерного целевого критерия.

**Практическая ценность работы:**

1) разработан комплекс программ для автоматизации этапов поиска решения задачи оптимального управления гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями;

2) разработано аппаратное обеспечение автоматизированной системы управления технологическим процессом, позволяющее реализовать найденный режим на объекте управления.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы используются на ООО «МОРШАНСКХИММАШ» (г. Моршанск, Тамбовская обл.), ООО «Гранит-М», (г. Уварово, Тамбовская обл.) и ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (г. Тамбов, Тамбовская обл.).

**На защиту выносятся следующие положения:**

1) способ циклического включения анодных секций с различными подаваемыми значениями напряжений;

2) решение задачи оптимального управления гальваническими процессами по критериям неравномерности покрытия и продолжительности технологического процесса, с учётом режима циклического включения анодных секций с помощью управляющего воздействия – функции анодных напряжений;

3) математическая модель гальванического процесса, учитывающая режим циклического включения анодных секций;

4) методика выбора вида оптимального управления;

5) метод определения оптимального количества анодных секций;

6) алгоритм прогнозирования результатов оптимального управления по значениям оценок эксперта по каждому из критериев;

7) структура, состав, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение автоматизированной системы управления, реализующие найденные оптимальные управления гальваническими процессами.

**Согласно паспорту специальности** в диссертационной работе предложены методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) (пункт 3 паспорта специальности), разработаны методы математического моделирования объектов управления (пункт 4), рассмотрены алгоритмы построения экспертных подсистем, включённых в АСУ ТП (пункт 16), и методы проектирования технического, математического, программного и аппаратного обеспечения АСУ (пункт 18).

**Апробация работы.** Результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, были признаны лучшими на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ аспирантов в области технических наук (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», г. Санкт-Петербург – 2012г.) и конкурсе молодых ученых «Лидер инноваций» (НОУ ДПО «ЦПП», г. Тамбов – 2013г.) по направлению «Автоматизация и управление». Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках Международных и Всероссийских конференций «Математические методы в технике и технологиях» (г. Саратов – 2010г., 2011г., 2012г.), «Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств» (г. Уфа – 2010г.), «Новые технологии и инновационные раз-

работки» (г. Тамбов – 2011г.), «Покрытия и обработка поверхности. Последние достижения в технологиях, экологии и оборудования» (г. Москва – 2012г.), «Технические науки – основа современной инновационной системы» (г. Йошкар-Ола – 2012г.) «Актуальные проблемы науки и образования: прошлое, настоящее будущее» (г. Тамбов – 2012г.), «Теория и практика актуальных исследований» (г. Краснодар – 2012г.), «Актуальные проблемы современной науки: свежий взгляд и новые подходы» (г. Йошкар-Ола – 2012г.), «Информационные системы и технологии» (г. Красноярск – 2012г.), «Наука и образование в XXI веке» (г. Тамбов – 2012г.), «Тенденции и инновации современной науки» (г. Краснодар – 2012г.), «Техника и технология: новые перспективы развития» (г. Москва – 2012г.), «Совершенствование технологии гальванических покрытий» (г. Киров – 2012г.), «Общество, современная наука и образование: проблемы и перспективы» (г. Тамбов – 2012г.), «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития» (г. Йошкар-Ола – 2013г.), «Теоретические и практические вопросы развития научной мысли в современном мире» (г. Уфа – 2013г.), «Современная наука: реальность и перспективы» (г. Липецк – 2013г.), «Перспективы развития научных исследований в 21 веке» (г. Москва – 2013г.).

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Роль соавторов в совместных публикациях заключается в следующем: Милованов И.В. – идея циклического режима работы многоанодной гальванической ванны, Литовка Ю.В. – постановка задачи исследования гальванических процессов с циклически включаемыми анодными секциями, Потлов А.Ю. – помощь в разработке части программного кода. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 32 печатные работы в научных журналах и сборниках, из которых 9 статей в периодических изданиях по списку ВАК, при этом 24 публикации без соавторов, а также получено 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка основных обозначений, использованных источников из 114 наименований и 3 приложений. Общий объём диссертационной работы 166 страниц, 56 рисунков и 11 таблиц. К диссертации прилагаются копии дипломов победителя Всероссийских конкурсов, свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, акты и справки о внедрении результатов исследований в производственный и учебный процесс.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** приводится краткое описание технологии получения гальванических покрытий. Проанализированы основные критерии качества гальванических покрытий, наиболее значимым среди которых признана равномерность толщины покрытия на поверхности изделия. Рассмотрены методы повышения равномерности покрытия с использованием перспективного оборудования, среди которого многоанодные ванны.

Проведен обзор работ по автоматизации, а также системам управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами, отмечены их основные недостатки, к которым относятся: использование управления с обратной связью не позволяет получить оптимальное качество покрытия; разработанные математические модели могут быть применены только для объектов, на которых проводился эксперимент; оптимальное проектирование конфигурации многосекционного анода связано с высокой технической сложностью и значительной стоимостью.

Предложен метод, основанный на варьировании напряжением на электродах в ванне, функционирующей в режиме циклического включения анодных секций. Сущность такого технологического процесса заключается в перенесении принципа растровой развёртки цифрового изображения из области телевизионного вещания в технологию электрохимической обработки изделий. Растровый метод переключения анодов состоит в том, что для управления электрохимическим осаждением металла используется развёртка, а градации напряжения на анодных секциях в гальванической ванне осуществляются при движении по строкам и столбцам в соответствующие промежутки времени. Каждая  $m, n$ -ая анодная секция подключается к общему источнику питания через программируемое устройство, позволяющее последовательно циклически осуществлять переключение системы анодных секций. При этом на время включения каждой  $m, n$ -й секции, подаваемое на неё напряжение может быть различным. Преимуществом предложенного технического решения является относительная простота аппаратной реализации и низкая стоимость гальванического оборудования (если анод состоит из системы  $M \times N$  секций, то возможно использовать источник питания, мощность которого в  $M \cdot N$  раз меньше источника питания при монолитном аноде с площадью равной сумме площадей всех  $M \cdot N$  секций).

Проведен анализ гальванического процесса с циклически включаемыми анодными секциями как объекта оптимального управления, схема которого приведена на рис. 1. При этом выявлены входные  $\bar{X}$ , выходные координаты  $\bar{Y}$ , а также координаты состояния объекта  $\bar{S}$ , и произведен выбор управляющих воздействий  $\bar{U}$ .





Рис. 1. Гальванический процесс как объект управления

-  $i_{km,n}(\tau)$  – катодная плотность тока, получаемая после включения  $m, n$ -й анодной секции и формирующая суммарную толщину покрытия  $\delta$  по закону Фарадея;

-  $T_1(v)$  – продолжительность гальванического процесса;

-  $\chi(C_w(\tau))$  – электропроводность электролита;

-  $\eta(i_{km,n}, C_w(\tau))$  – катодный выход металла по току;

-  $C_w(\tau)$  – концентрация  $w$ -го компонента электролита;

-  $U_{m,n}(\tau)$  – функция изменения напряжения между катодом и  $m, n$ -й анодной секцией, включенной на время  $\Delta\tau$ , и общее число циклов включения системы анодных секций составляет  $v$  раз.

Сформулирована задача оптимального управления гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями, математическая постановка которой звучит следующим образом.

Найти функцию изменения напряжения  $U_{m,n}^*(\tau)$  на каждой секции анода  $S_{m,n}$  для заданной формы детали-катода  $S_K$  из поступающей на обработку партии и текущей концентрации компонентов электролита  $C_w(\tau)$ , доставляющие минимум целевого вектора критериев:

$$\Phi(\tau, v) = \{ R(\tau), T_1(v) \} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при уравнениях связи:

$$\begin{cases} R(\tau) = \frac{1}{\|S_K\|_{S_K}} \int \frac{\delta(x, y, z, \tau) - \delta^{\min}(\tau)}{\delta^{\min}(\tau)} dS_K + \frac{\delta^{\max}(\tau) - \delta^{\min}(\tau)}{\delta^{\min}(\tau)} \\ T_1(v) = v \cdot M \cdot N \cdot \Delta\tau \end{cases} \quad (2)$$

и ограничениях:

$$\begin{cases} \delta^{\min}(T_1) \geq \delta^{\text{зад}}, \\ \Delta\tau \geq \Delta\tau^{\min} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $R(\tau)$  – критерий неравномерности толщины покрытия;  $\|S_K\|$  – площадь поверхности катода;  $\delta(x, y, z, \tau)$  – толщина покрытия в точке катода с пространственными координатами  $(x, y, z)$ , полученная за промежуток времени  $\tau$ ;  $\delta^{\max}(\tau)$ ,  $\delta^{\min}(\tau)$ ,  $\delta^{\text{зад}}(\tau)$  – максимальная, минимальная и заданная толщина покрытия;  $M$ ,  $N$  – количество горизонтальных рядов и количество анодных секций в каждом ряду;  $\Delta\tau^{\min}$  – минимально допустимое время работы анодной секции.

Здесь приняты следующие обозначения:

-  $\Gamma$  – геометрические характеристики электродов (размеры, форма, площадь поверхности), их количество и расположение в ванне;

-  $\Theta$  – тип гальванического процесса (металл покрытия, электролит);

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели (ММ) гальванического процесса с циклически включаемыми анодными секциями. На основании принятых допущений предлагается следующая система уравнений ММ для рассматриваемого процесса:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \delta(x, y, z, T_1) = \nu \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \delta_{m,n}(x, y, z, \tau) \\
 \delta_{m,n}(x, y, z, \tau) = \frac{\mathcal{E}}{\rho} \eta(x, y, z, \tau) i_{K_{m,n}}(x, y, z, \tau) \cdot \Delta \tau \\
 \eta(x, y, z, \tau) = \eta(t, i_{K_{m,n}}(x, y, z, \tau), C_1(\tau), \dots, C_2(\tau), \dots, C_w(\tau)) \\
 \frac{dC_w(\tau)}{d\tau} = f_w(t, i_{K_{m,n}}(\tau), C_1(\tau), \dots, C_2(\tau), \dots, C_w(\tau)) \\
 \bar{i}_{K_{m,n}}(\tau) = \frac{1}{\|S_K\|} \int_{S_K} i_{K_{m,n}}(x, y, z, \tau) dS_K \\
 i_{m,n}(x, y, z, \tau) = -\chi \cdot (\nabla \varphi(x, y, z, \tau), \bar{n}_{m,n}) \Big|_{S_{m,n}} \in S_{m,n} \\
 i_{K_{m,n}}(x, y, z, \tau) = \chi \cdot (\nabla \varphi(x, y, z, \tau), \bar{n}_K) \Big|_{S_K} \in S_K \\
 \frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{c^2}{4\pi\chi\mu_n} \left( \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) \Big|_{V_0} \\
 \frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \bar{n}_n} \Big|_{S_n} = 0 \\
 \varphi(x, y, z, \tau) + F_1(i_{m,n}(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_{m,n}} = U_{m,n}(\tau) \\
 \varphi(x, y, z, \tau) - F_2(i_{K_{m,n}}(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_K} = 0
 \end{array} \right. \quad (4)$$

с начальными

условиями:

$$\begin{cases} C_w(0) = C_{0w} \\ \varphi(x, y, z, 0) = \varphi_0(x, y, z) \end{cases} \quad (5)$$

и ограничениями:

$$\begin{cases} C_{w\min} \leq C_w(\tau) \leq C_{w\max} \\ 0 < U_{m,n}(\tau) \leq U_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

где  $\delta_{m,n}$  – толщина покрытия в точке катода с пространственными координатами  $(x, y, z)$  после работы  $m, n$ -го анода в течение времени  $\Delta \tau$ ;  $\mathcal{E}$  – электрохимический эквивалент металла покрытия;  $\rho$  – плотность металла покрытия;  $t, W$  – температура и количество компонентов электролита;  $C_{w\min}, C_{w\max}, C_{0w}$  – минимальная, максимальная и концентрация  $w$ -го компонента в свежеприготовленном электролите;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\mu_n$  – магнитная проницаемость электролита;  $\nabla \varphi$  – градиент потенциала электрического поля в точке ванны с пространственными координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $\tau$ ;  $\varphi_0$  – распределение поля при  $\tau = 0$ ;  $V_0$  – область электролита;  $\bar{i}_{K_{m,n}}$  – средняя катодная плотность тока;  $\bar{n}_{m,n}, \bar{n}_K, \bar{n}_n$  – нормаль к поверхности  $m, n$ -го анода, катода и изолятора;  $S_n$  – поверхность изолятора;  $U_{\max}$  – максимальное значение возможного напряжения;  $F_1, F_2$  – функции анодной и катодной поляризации.

Особенностью ММ является то, что для дифференциального уравнения в частных производных параболического типа, описывающего распределение потенциала в объёме ванны, в граничное условие добавлена функция изменения анодного напряжения для системы секций.

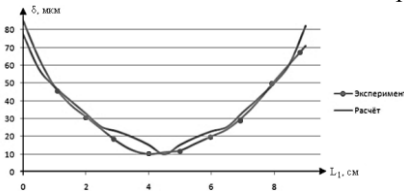
Разработан алгоритм решения уравнений ММ на основе применения сеточных методов, отличающийся тем, что для задания режима циклического включения анодных секций используется предложенная геометрическая модель рецепторного типа следующего вида:

$\forall \tau \in [0; T_1], \forall k = 1, \dots, v:$

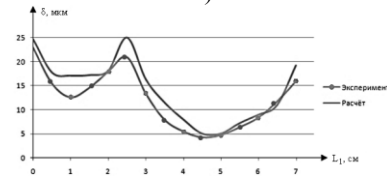
$$G(x, y, z, \tau) = \begin{cases} 0, & \text{если } (x, y, z) \text{ точка принадлежит электролиту;} \\ 1, m, n, & \text{если } (x, y, z) \text{ точка принадлежит } m, n \text{- ому аноду;} \\ \begin{cases} m = a, & \text{если } k \cdot (a-1) \cdot N \cdot \Delta\tau \leq \tau < k \cdot a \cdot N \cdot \Delta\tau, a = 1, \dots, M; \\ n = b, & \text{если } k \cdot ((b-1) + (a-1) \cdot N) \cdot \Delta\tau \leq \tau < k \cdot (b + (a-1) \cdot N) \cdot \Delta\tau, b = 1, \dots, N; \end{cases} \\ 2, & \text{если } (x, y, z) \text{ точка принадлежит катоду;} \\ 3, & \text{если } (x, y, z) \text{ точка принадлежит изолятору.} \end{cases} \quad (7)$$

Для сеточного представления решения исходной задачи приводится конечно-разностная аппроксимация дифференциального уравнения в частных производных с соответствующими краевыми условиями, для расчёта которой описывается вычислительная схема метода нижней релаксации.

Проверены адекватность построенной математической и работоспособность геометрической моделей путём сравнения с данными физического эксперимента для гальванических процессов никелирования (эксперимент 1) и цинкования (эксперимент 2). В эксперименте 1 использовалась одна анодная секция и катод V-образной формы, а в эксперименте 2 – две анодные секции и катод Z-образной формы. На рис. 2.а изображены



а)



б)

Рис. 2. Распределение толщины покрытия по поверхности катода. Представлено для среза параллельного дну гальванической ванны

результаты расчёта и измерения распределения толщины покрытия на поверхности катода размерами  $L_1 \times L_2$  см при продолжительности процесса  $T_1 = 0.8$  ч напряжении  $U_{1,1}(\tau) = 4$  В и для эксперимента 1, на рис. 2.б – при продолжительности процесса  $T_1 = 1$  ч и напряжениях  $U_{1,1}(\tau) = 1.5$  В,  $U_{1,2}(\tau) = 2$  В и для эксперимента 2. Относительная погрешность расчёта толщины покрытия не превышала 17 %, что соизмеримо с погрешностью прибора измерения толщины покрытия, а погрешность между критериями, полученными по расчетным и измеренным значениям, не превосходила 5 %, что является допустимым при моделировании гальванических процессов.

В связи с чем сделан вывод о пригодности разработанных моделей для решения поставленной задачи оптимального управления процессом.

**В третьей главе** приведен обзор и анализ методов решения многокритериальной задачи оптимального управления гальваническими про-

цессами с циклическим включением анодных секций, на основе которого было отдано предпочтение использованию метода «свёртки» с обобщенным критерием аддитивного вида в качестве целевого критерия оптимальности процесса. Тогда задача оптимального управления (1), поставленная в главе 1, будет звучать следующим образом.

Найти функцию изменения напряжения  $U_{m,n}^*(\tau)$  на каждой секции анода  $S_{m,n}$  для заданной формы детали-катода  $S_K$  из поступающей на обработку партии и текущей концентрации компонентов электролита  $C_w(\tau)$ , доставляющие минимум целевого критерия:

$$J(\alpha, \beta) = \alpha \cdot R^{\text{норм}}(\tau) + \beta \cdot T_1^{\text{норм}}(v) \rightarrow \min, \quad (8)$$

причём значения весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  удовлетворяют системе ограничений:

$$\begin{cases} 0 < \alpha, \beta < 1, \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (9)$$

а нормированные значения частных критериев определяются как:

$$\begin{cases} R^{\text{норм}}(\tau) = \frac{R(\tau)}{R^{\text{max}}} \\ T_1^{\text{норм}}(v) = \frac{T_1(v)}{T_1^{\text{max}}} \end{cases} \quad (10)$$

Для поставленной задачи оптимального управления (8) описан способ решения, базирующийся на модификации метода Ритца. Исходя из принципа циклического включения анодных секций, функция анодного напряжения должна быть импульсного вида. В качестве  $U_{m,n}(\tau)$  предлагается использовать полиномов вида:

$$\begin{aligned} \forall \tau \in [\tau_0 = 0, \tau_1], \dots, [\tau_r, \tau_{r+1}], \dots, [\tau_{r^{\text{зад}}-1}, \tau_{r^{\text{зад}}} = T_1]: \\ U_{m,n}(\tau) = \begin{cases} \sum_{p=0}^P u_{p,m,n} \cdot \tau^p, & \text{если } \sum_{p=0}^P u_{p,m,n} \cdot \tau^p < U_{\text{max}}, \\ U_{\text{max}}, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (11) \end{aligned}$$

причем  $\tau = \tau_r + (n-1 + (m-1) \cdot n) \cdot \Delta\tau$ , где  $r^{\text{зад}}$  – заданное число отрезков;  $P$  – степень управляющего полинома.

На основании анализа рельефа целевого критерия предложено искать неизвестные коэффициенты  $u_{p,m,n}$  «овражным» методом. В качестве алгоритма локального поиска метода «оврагов» выбран алгоритм Нелдера-Мида, показавший себя наилучшим с точки зрения точности вычисления экстремума и затрат машинного времени.

На рис. 3 показаны найденные оптимальные управления гальваническим процессом хромирования в двуханодной ванне для катода Z-образной формы при значениях весовых коэффициентов  $\alpha = 0.34$ ,  $\beta = 0.66$  и минимальной толщине покрытия 15 мкм. Продемонстрировано, что выбор степени управляющего полинома больше единицы при существенном изменении концентрации компонентов электролита за время проведе-

ния процесса нецелесообразно с точки зрения несоизмеримости уточнения экстремума по отношению к затрачиваемому времени.

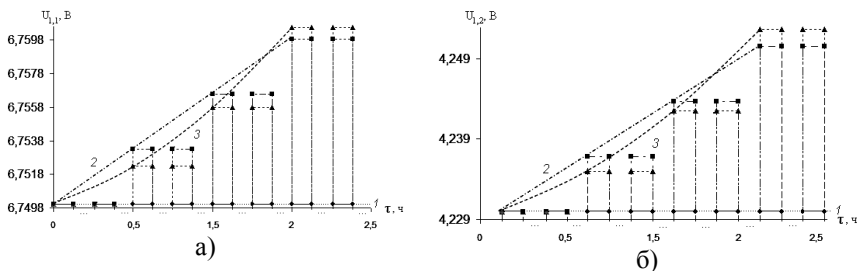


Рис. 3. Функции изменения напряжения для анодных секций с индексом 1,1 (а) и 1,2 (б): линия 1 – полином 0-й степени, линия 2 – полином 1-й степени, линия 3 – полином 2-й степени

Впервые предложен метод определения оптимального количества анодных секций, заключающийся в варьировании размерности анодных секций в зависимости от прироста величины целевого критерия. Метод учитывает оба критерия оптимальности управления, что отличается от существующего способа выбора размера анодов, определяющегося геометрическими размерами гальванической ванны.

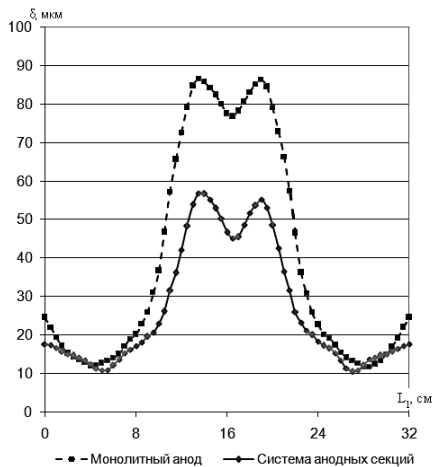


Рис. 4. Распределение толщины покрытия по поверхности катода. Представлено для среза параллельно-го дну гальванической ванны

Разработана методика оценки влияния весовых коэффициентов на получаемое решение, заключающаяся в аппроксимации частных критериев квадратичными функциями и поиске минимума полученного на их основе аддитивного одномерного целевого критерия (8), формируемого с привлечением эксперта. Демонстрируется решение задачи оптимального управления гальваническим процессом никелирования в ванне с системой из 2x3 секций для катода Т-образной формы. На рис. 4 показан сравнительный срез распределения толщины покрытия на поверхности катода, полученный экспериментальным путем с использованием монолитного анода и системы анодных секций.

При значениях весовых коэффициентов  $\alpha = 0.16$ ,  $\beta = 0.84$  и минимальной толщине покрытия 10 мкм значения напряжений для системы анодных секций:  $U_{1,1}^* = 9.04$  В,  $U_{1,2}^* = 5.01$  В,  $U_{1,3}^* = 9.11$  В,  $U_{2,1}^* = 8.95$  В,  $U_{2,2}^* = 4.87$  В,  $U_{2,3}^* = 9.07$  В, – для монолитного анода  $U^* = 9.9$  В. При этом снижение неравномерности толщины покрытия составило 33.6 %.

**В четвертой главе** на основе анализа достоинств и недостатков существующих систем управления гальваническими процессами предложена структурная схема автоматизированной системы управления (АСУ ТП) по возмущению (рис. 5) для рассматриваемого процесса. Система управления получает сведения о значении входных координат и задающего воз-



Рис. 5. Структурная схема системы управления по возмущению

действия  $\bar{z}$ : заданная толщина покрытия и значения весовых коэффициентов. В результате взаимодействия поискового алгоритма  $g$  и ММ  $f$  на входе управляющего устройства (УУ) формируется информация  $\bar{k}$  об оптимальном режиме нанесения гальванического покрытия. УУ реализует найденный режим на объекте управления с помощью исполнительного механизма (ИМ) путем задания необходи-

мых команд  $\bar{k}$ . Автором предлагается следующая трехуровневая АСУ ТП (рис. 6), реализующая выбранную схему управления. На верхнем уровне находится расчётная ЭВМ, решающая задачи ввода исходных, ведения баз данных готовых проектов, поиска оптимального управления и вывода результатов. При этом задача управления сводится к задаче стабилизации найденных значений напряжений и решается аппаратно на нижнем уровне управляющей ЭВМ при помощи ИМ, осуществляющего циклическое переключение анодных секций с регулированием подаваемого напряжения, посредством предложенной системы команд для управляющей ЭВМ.

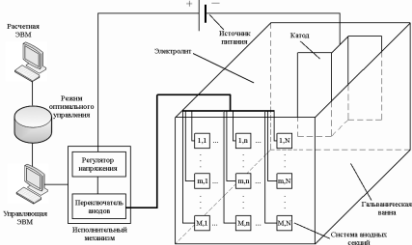


Рис. 6. Упрощенная трёхуровневая схема АСУ ТП

Разработано программное обеспечение, реализующее автоматизированный поиск и управление рассматриваемым процессом, и описана методика работы операторов с ним на конкретном примере из главы 3.

Для ИМ разработаны электрические принципиальные и топологические схемы для регулирования напряжения и переключения анодов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод снижения неравномерности толщины гальванического покрытия, основанный на режиме циклического включения анодных секций с различными значениями напряжения, для которого сформулирована задача оптимального управления.

2. Разработана математическая модель гальванического процесса, связывающая критерии оптимальности с напряжениями на анодных секциях, и предложен алгоритм расчёта, учитывающий режим циклического включения анодных секций посредством геометрической модели рецепторного типа. Для разработанной модели проверена адекватность.

3. Для решения задачи управления выбран метод «свёртки» с критерием линейного вида. Для поиска управления использован метод «обратов» в сочетании с алгоритмом Нелдера-Мида, показавшего себя до 1.5 раз эффективнее при той же точности вычисления экстремума.

4. Разработан метод поиска вида функции управления в классе полиномов различной степени, при этом показывается, что выбор степени больше единицы нецелесообразен с точки зрения несоизмеримости уточнения значения целевого критерия (до 0.1 %) по отношению к приращению затрат машинного времени (от 22 %).

5. Разработаны методы определения оптимального количества анодных секций, учитывающий прирост величины целевого критерия, и прогнозирования получаемого управления с привлечением эксперта.

6. Для рассмотренного примера система анодных секций размерностью 2x3 снизила неравномерность толщины покрытия на 33.6 % и затрачиваемую источником питания мощность в 2.81 раза.

7. Разработано программное обеспечение и собран опытный образец исполнительного механизма для системы управления гальваническим процессом с циклически включаемыми анодными секциями.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых журналах по списку ВАК:*

1. Соловьев, Д.С. Система оптимального управления гальванической ванной с циклическим включением анодных секций / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка, И.В. Милованов // Радиотехника. – 2010. – № 12. – С. 44 – 48.

2. Соловьев, Д.С. Оптимизация режимов работы гальванической ванны с циклическим включением анодных секций / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка, И.В. Милованов // Радиотехника. – 2011. – № 5. – С. 71 – 77.

3. Соловьев, Д.С. Проверка адекватности математической модели распределения гальванического покрытия на детали в многоанодной ванне / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т.18, №1. – С. 128 – 135.

4. Соловьев, Д.С. Автоматизированная система управления гальваническими процессами в многоанодной электрохимической ванне / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 7. – С. 15 – 22.

5. Соловьев, Д.С. Математическое, программное и аппаратное обеспечение системы управления гальваническими процессами в ванне со многими анодами [Электронный ресурс] / Д.С. Соловьев // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr12/2/text.pdf> (дата обращения 7.05.2014).

6. Соловьев, Д.С. К вопросам математического моделирования гальванических процессов с циклическим включением анодных секций / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – №1(64). – С. 181 – 187.

7. Соловьев, Д.С. Получение толщины гальванического покрытия с повышенной равномерностью / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №1. – С. 39 – 43.

8. Соловьев, Д.С. Математическое моделирование и оптимальное управление процессом осаждения гальванического покрытия в многоанодной ванне с учетом изменения концентрации компонентов электролита // Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т.5, №2. – С. 193 – 203.

9. Соловьев, Д.С. Программный комплекс для автоматизации управления гальваническими процессами с циклическим включением анодных секций // Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Автоматизация процессов управления. – 2013. – №2(32). – С. 35 – 42.

*Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:*

10. Соловьев, Д.С. Программа управления гальванической ванной с циклическим включением анодных секций // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2011617252. – 19.09.2011 г.

11. Соловьев, Д.С. Программа оптимизации токовых режимов гальванической ванны с циклическим включением анодных секций // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2011617253. – 9.09.2011 г.

12. Соловьев, Д.С. Информационная подсистема гальванических процессов с циклическим включением анодных секций / Д.С. Соловьев, А.Ю. Потлов // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2012614474. – 18.05.2012 г.

13. Соловьев, Д.С. Расчет изменения концентрации компонентов электролита в гальванической ванне / Д.С. Соловьев, А.Ю. Потлов // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2012614476. – 18.05.2012 г.

14. Соловьев, Д.С. Программа визуализации распределения гальванического покрытия по поверхности детали // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2012615096. – 07.06.2012 г.

15. Соловьев, Д.С. Экспертная система поддержки принятия решения при выборе значений априорных коэффициентов для проектирования гальванических процессов в ванне со многими анодами // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2012617296. – 14.08.2012 г.

16. Соловьев, Д.С. Автоматизированное построение чертежных проекций детали-катода // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2013610311. – 09.01.2013 г.

17. Соловьев, Д.С. Визуализация решения задачи оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия в электрохимической ванне, функционирующей в режиме циклического переключения анодных секций // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ ФИПС №2013610312. – 09.01.2013 г.



*Прочие публикации:*

18. Соловьев, Д.С. Разработка алгоритмов и программ решения задачи оптимизации равномерности гальванического покрытия / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-23: сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. – Саратов. – 2010. – Т.9. – С. 45 – 47.

19. Соловьев, Д.С. Математическое моделирование гальванической ванны с циклическим включением анодных секций / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств: сб. тр. Всеросс. науч.-техн. конф. – Уфа. – 2010. – С. 142 – 143.

20. Соловьев, Д.С. Оптимальное управление многоанодной гальванической ванной с циклическим включением анодных секций / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-24: сб. тр. XXIV Междунар. науч. конф. – Саратов. – 2011. – Т.8. – С. 74 – 76.

21. Соловьев, Д.С. Алгоритм функционирования устройства управления многоанодной системой с выпрямителем FLEX KRAFT / Д.С. Соловьев // Новые технологии и инновационные разработки: материалы IV Межвуз. науч.-практ. ежегод. конф. – Тамбов. – 2011. – С. 126 – 128.

22. Соловьев, Д.С. Многоанодная электрохимическая ванна как перспективное оборудование для снижения неравномерности наносимого гальванопокрытия / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Покрытия и обработка поверхности. Последние достижения в технологиях, экологии и оборудования: 9-я Междунар. конф. – Москва. – 2012. – С. 113 – 115.

23. Соловьев, Д.С. Система команд устройства управления гальванопроцессами в многоанодных ваннах / Д.С. Соловьев // I Междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки – основа современной инновационной системы». – Йошкар-Ола. – 2012. – Т.1. – С. 127 – 128.

24. Соловьев, Д.С. Линейная свертка критериев в задаче многокритериальной оптимизации нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами // Актуальные проблемы науки и образования: прошлое, настоящее будущее: Матер. Междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Тамбов. – 2012. – Т.7. – С. 114 – 115.

25. Соловьев, Д.С. Информационная модель данных для САПР гальванических процессов в многоанодных ваннах / Д.С. Соловьев // I Междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки – основа современной инновационной системы». – Йошкар-Ола. – 2012. – Т.1. – С. 134 – 135.

26. Соловьев, Д.С. Численный расчет распределения потенциала в гальванической ванне со многими анодами / Д.С. Соловьев // Теория и практика актуальных исследований: Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар. – 2012. – Т.2. – С. 248 – 250.

27. Соловьев, Д.С. Рецепторная геометрическая модель в задаче расчета распределения толщины покрытия в гальванической ванне со многими анодами / Д.С. Соловьев // I Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы современной науки: свежий взгляд и новые подходы». – Йошкар-Ола. – 2012. – Т.1 – С. 40 – 42.

28. Соловьев, Д.С. Количественные и качественные характеристики для математического моделирования гальванического покрытия / Д.С. Соловьев // Наука и образование в XXI веке: Матер. Междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Тамбов. – 2012. – Т.4. – С. 104 – 105.

29. Соловьев, Д.С. Экспертная система поддержки принятия решения при выборе значений априорных коэффициентов для проектирования гальванических процессов в ванне со многими анодами / Д.С. Соловьев // Информационные системы и технологии: Междунар. науч.-техн. конф. – Красноярск. – 2012. – С. 42–46.
30. Соловьев, Д.С. Оптимальное управление гальваническим процессом в многоанодной ванне с учетом изменения концентрации компонентов электролита / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-25: сб. тр. XXV Междунар. науч. конф. – Саратов. – Т.8.–2012.– С.117–120.
31. Соловьев, Д.С. Управление напряжением на анодных секциях с целью компенсации влияния убыли компонентов электролита на производительность многоанодной гальванической ванны / Д.С. Соловьев // Тенденции и инновации современной науки: Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар. – 2012. – С. 83.
32. Соловьев, Д.С. Варьирование анодного напряжения как вариант управляющего воздействия на гальванический процесс в электрохимической ванне / Д.С. Соловьев // Техника и технология: новые перспективы развития: Матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. – Москва. – 2012. – С. 95 – 97.
33. Соловьев, Д.С. Технология нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // XV междунар. сов. «Совершенствование технологии гальванических покрытий».–Киров.–2012.–С.105–106.
34. Соловьев, Д.С. Автоматизированная система управления гальваническим процессом с циклическим включением анодных секций // Всеросс. конкурс науч.-исслед. работ студ. и асп. в обл. техн. наук. – СПб. – 2012. – С. 27 – 29.
35. Соловьев, Д.С. Исполнительное устройство системы управления гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями / Д.С. Соловьев // Общество, современная наука и образование: проблемы и перспективы: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов. – 2012. – Т.4. – С. 118 – 119.
36. Соловьев, Д.С. Интегрированная система автоматизированного проектирования и управления гальваническим процессом в ванне со многими анодами / Д.С. Соловьев // Тенденции и инновации современной науки: Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. Сб. науч. трудов. – Краснодар. – 2012. – С. 75.
37. Соловьев, Д.С. Программное обеспечение для расчета изменения концентрации компонентов электролита в гальванической ванне / Д.С. Соловьев // I Междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития». – Йошкар-Ола. – 2013. – С. 117 – 119.
38. Соловьев, Д.С. Программное обеспечение для поиска оптимального режима нанесения покрытия в многоанодной ванне / Д.С. Соловьев // Теоретические и практические вопросы развития научной мысли в современном мире: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа. – 2013. – С. 227 – 230.
39. Соловьев, Д.С. Методы повышения равномерности гальванических покрытий с использованием многоанодных ванн / Д.С. Соловьев // Современная наука: реальность и перспективы: сб. науч. тр. по матер. Междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Липецк. – 2013. – С. 88 – 89.
40. Соловьев, Д.С. Гальванический процесс с циклическим включением анодных секций как объект управления / Д.С. Соловьев // Перспективы развития научных исследований в 21 веке: Сб. матер. 1-й междунар. науч.-практ. конф. – Москва. – 2013. – С. 80 – 82.

