

На правах рукописи



ЕГОРОВ Андрей Сергеевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
УПРАВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ С РЕВЕРСОМ ТОКА**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
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 «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»
Проталинский Олег Мирославович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет»
Камаев Валерий Анатольевич

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Защита диссертации состоится 21 ноября 2014 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: г. Тамбов, ул. Советская, 106, Большой зал.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ» и на сайте www.tstu.ru.

Автореферат разослан «___» 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.260.01
д.т.н., профессор



А.А. Чуриков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для защиты металлов от коррозии, декоративной отделки изделий, увеличения твёрдости и износостойкости поверхности, повышения электропроводящих и улучшения антифрикционных свойств применяются покрытия, получаемые преимущественно гальваническим методом. В настоящее время для гальванических покрытий используется несколько десятков металлов. Среди них следует выделить никелевые покрытия, широко используемые в различных отраслях промышленности. Это объясняется их физико-механическими и химическими свойствами. Никелем покрывают изделия из стали и цветных металлов для защиты от коррозии, декоративной отделки поверхности, повышения сопротивления механическому износу. Никелевые покрытия имеют высокую антикоррозионную стойкость в атмосфере, в растворах щелочей и в некоторых органических кислотах, что, в значительной степени, обусловлено сильно выраженной способностью никеля к пассивированию в этих средах. В связи с этим изучение процесса никелирования является актуальным.

Применительно к гальваническому способу нанесения покрытия на сегодняшний день разработаны и продолжают совершенствоваться автоматизированные системы управления гальваническими процессами в соответствии с такими критериями, как неравномерность, микротвёрдость, пористость, износостойкость, коррозионная стойкость и т.д. Наиболее важным критерием качества наносимого покрытия является равномерность распределения его толщины по поверхности детали. Толщина покрытия на некоторых участках изделия менее заданной приводит к отбраковке детали. Превышение заданной толщины приводит к перерасходу никеля и электроэнергии, что снижает экономическую эффективность производственного процесса. Для предотвращения брака в производственном процессе необходимо создание автоматизированных управления гальваническими процессами, реализующих алгоритмы оптимизации гальванических процессов в соответствии с критерием неравномерности. Основные исследования в разработке методов улучшения равномерности гальванических покрытий проводились отечественными учеными Г.Т.Бахваловым, Л.И. Каданером, Н.Т. Кудрявцевым, Ю.В. Литовкой и др. Среди зарубежных работ стоит отметить труды С. Kollia, N. Spyrellis, S. Isizaka, H. Matsuda, P.T. Tang, A.M. El-Sherik.

Таким образом, весьма актуальной является задача оптимизации и управления процессом нанесения гальванического никелевого покрытия, обеспечивающие получение наиболее равномерных покрытий.

Настоящая диссертационная работа выполнялась в соответствии с ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

Целью работы является создание автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока для повышения качества

никелевого покрытия в соответствии с критерием неравномерности. Научная проблема, соответствующая данной цели, заключается в оптимизации и управлении процессом гальванического никелирования в соответствии с выбранным критерием.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, теории автоматического управления, численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, в том числе сеточные методы.

Научная новизна работы:

1. Поставлена задача оптимизации процесса нанесения гальванического никелевого покрытия в соответствии с критерием неравномерности, отличающаяся использованием реверсивного тока.

2. Процесс нанесения гальванических покрытий формализован с точки зрения синтеза автоматизированной системы управления технологическим процессом, имеющим частотные свойства.

3. Получены аналитические математические модели для определения предельной частоты изменения параметров электрохимической системы в процессе нанесения покрытия, учитывающие изменение полосы пропускания гальванической системы от геометрического фактора технологического объекта управления.

4. Разработан алгоритм функционирования измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) для определения предельной частоты гальванического процесса с реверсом тока, отличающийся методом расчета параметров электрохимической системы на основе реакции системы на воздействие в форме функции Хевисайда.

Практическая ценность работы:

– разработана программа решения системы уравнений математической модели процесса никелирования с использованием реверсивного тока, а также программа решения задачи оптимизации гальванического процесса с реверсом тока;

– разработано устройство реверсирования тока (мостовой инвертор), позволяющее расширить временной диапазон существующих выпрямительных агрегатов в режиме реверсирования тока;

– разработан измерительно-вычислительный комплекс для нахождения предельной частоты процесса нанесения никелевого гальванического покрытия с использованием реверсивного тока;

– разработана автоматизированная система управления процессом нанесения никелевых гальванических покрытий с использованием реверсивного тока.

Диссертация соответствует пунктам 2, 4, 8, 11 паспорта специальности 05.13.06.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы в ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов) и ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (г. Тамбов).

Апробация работы. Основные положения и результаты данной работы докладывались на Международных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (г. Саратов – 2011, 2012 г., г. Ангарск – 2013 г.), «Совершенствование технологии гальванических покрытий» (г. Киров – 2012 г.) и «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (г. Саратов – 2013 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано пять печатных работ в научных журналах, рекомендованных ВАК, пять докладов на Международных конференциях, получен патент на полезную модель и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 121 странице и состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка использованных источников и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана её новизна и практическая ценность.

В первой главе проведён анализ процесса нанесения гальванического покрытия. Рассмотрены важнейшие области применения электролитических покрытий. Проанализированы существующие методы повышения равномерности гальванических покрытий и их недостатки. Обоснован выбор метода повышения равномерности с использованием реверсивного тока. Проведён анализ возможностей оборудования и систем управления гальваническими процессами, использующихся для повышения равномерности получаемых покрытий. Сделан обзор и анализ источников по использованию реверсивного режима для улучшения качества никелевых гальванических покрытий. На основании обзора сделан вывод о том, что для реверсивного режима нанесения никелевых гальванических покрытий не исследован такой важный параметр, как равномерность получаемого покрытия. В связи с этим, необходимо создание математической модели процесса нанесения никелевого гальванического покрытия в режиме с реверсированием тока. Также сделан вывод о том, что для данного режима возможности серийного оборудования недостаточны, следовательно, требуется разработать систему управления гальваническим процессом с необходимыми характеристиками. Тем самым обоснована новизна данной работы.

Поставлена задача исследования в следующем виде.

Для детали заданной формы из поступающей на обработку партии найти вектор управляющих воздействий $\bar{U} = \{\tau_n, \tau_{об}, N\}$, доставляющий минимум критерию неравномерности R и выполнении ограничения $\delta_{min} \geq \delta_{зад}$,

где τ_n – длительность включения прямого тока, $\tau_{об}$ – длительность включения реверсивного тока, N – количество включений прямого и реверсивного тока, $R = S_k^{-1} \int ((\delta(x,y,z) - \delta_{min}) / \delta_{min}) dS_k$, δ_{min} – минимальная толщина покрытия, $\delta(x,y,z)$ – толщина покрытия в точке с координатами (x,y,z) , $\delta(x,y,z) > 0$, S_k – площадь поверхности катода.

Вторая глава посвящена математическому моделированию гальванического процесса нанесения никелевого покрытия в режиме с реверсированием тока.

Прирост толщины покрытия в точке детали с координатами (x, y, z) в течение τ_n j -го «прямого» включения тока рассчитывается по формуле, полученной из закона Фарадея:

$$\delta_j^+(x, y, z) = \mathcal{E} / \rho \cdot \eta_k i_k(x, y, z) \tau_n,$$

где \mathcal{E} – электрохимический эквивалент вещества; η_k – катодный выход по току; ρ – плотность металла покрытия; $i_k(x,y,z)$ – катодная плотность тока в точке катода с координатами (x,y,z) .

Исходя из закона Ома в дифференциальной форме, плотность тока на катоде во время включения прямого тока будет рассчитываться по формуле:

$$i_k(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_n(x, y, z) \Big|_{S_k},$$

где χ – удельная электропроводность электролита; φ_n – потенциал электрического поля при «прямом» включении тока.

Для нахождения распределения потенциала φ_n в ванне используется дифференциальное уравнение Лапласа с краевыми условиями:

$$\partial^2 \varphi_n / \partial x^2 + \partial^2 \varphi_n / \partial y^2 + \partial^2 \varphi_n / \partial z^2 = 0,$$

$$\partial \varphi_n / \partial n \Big|_{S_n} = 0,$$

$$\varphi_n + F_1(i_a) \Big|_{S_a} = U_n,$$

$$\varphi_n - F_2(i_k) \Big|_{S_k} = 0,$$

где S_n – площадь поверхности изолятора; $F_1(i_a)$ – функция анодной поляризации; S_a – площадь поверхности анода; $F_2(i_k)$ – функция катодной поляризации.

Аналогично записываются соотношения для периода включения реверсивного тока:

$$\delta_j^-(x, y, z) = -\mathcal{E} / \rho \cdot \eta_a i_a(x, y, z) \tau_{об},$$

$$i_a(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_{об}(x, y, z) \Big|_{S_k} \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial z^2} = 0,$$

$$\partial\varphi_{об} / \partial n |S_{и} = 0, \varphi_{об} + F_1(i_a) |S_k = U_{об}, \varphi_{об} - F_2(i_k) |S_a = 0,$$

где $\delta_j^-(x, y, z)$ - уменьшение толщины покрытия за счет электрохимического растворения в течение $\tau_{об}$ j-го «обратного» включения тока; $i_a(x, y, z)$ - анодная плотность тока в точке катода с координатами (x, y, z) ; η_a - анодный выход по току; $\varphi_{об}$ - потенциал электрического поля при «обратном» включении тока.

Для проверки адекватности составленной модели были проведены эксперименты по нанесению никелевого гальванического покрытия из электролита Уоттса с использованием реверсивного тока. Согласно одним литературным источникам, для получения твердого покрытия частота процесса должна быть в пределах от 10^{-2} до 10^{-1} Гц. Однако согласно другим источникам, для получения твердых покрытий частота должна принимать значение от $3 \cdot 10^{-1}$ до $1.7 \cdot 10^2$ Гц. Таким образом, для проведения экспериментов, необходимо оборудование, способное выдавать импульсы длительностью от единиц миллисекунд. В подавляющем большинстве выпускаемые выпрямительные агрегаты для применения режима реверсирования тока не обладают такими характеристиками. Так, например, используемый в данной работе высокоточный программируемый выпрямительный агрегат Flex Kraft FLX-01 ver. 02.41 (модель 2009 г., «Kraftelektronik AB», Швеция (с 2011г. «KraftPowercon Sweden AB»)) способен выдавать импульсы прямого и реверсивного токов длительностью не менее 1 с. Индивидуальное изготовление выпрямительных агрегатов с нужными характеристиками для небольших промышленных предприятий или для исследовательских целей является чрезмерно затратным. В связи с этим, было разработано устройство реверсирования тока (мостовой инвертор), защищённое патентом на полезную модель и позволяющее расширить частотный диапазон существующего оборудования.

Планирование экспериментов осуществлялось с применением равномерно-распределенных последовательностей. Сравнение экспериментальных и расчётных значений по критерию неравномерности показали погрешность математической модели 21,3%. Поскольку погрешность прибора неразрушающего контроля «Константа К5», с использованием которого производилось измерение толщины покрытия, составляет $10\% \pm 1$ мкм, математическую модель можно считать адекватной.

Третья глава посвящена оптимизации процесса нанесения гальванического покрытия в режиме с реверсированием тока.

Математическая модель процесса нанесения гальванического покрытия с реверсом тока имеет следующий вид:

$$\delta(x, y, z) = \sum_{j=1}^N (\delta_j^+(x, y, z) + \delta_j^-(x, y, z)), \quad \delta_j^+(x, y, z) = \frac{\Theta}{\rho} \eta_k i_k(x, y, z) \tau_n,$$

$$\delta_j^-(x, y, z) = -\frac{\Theta}{\rho} \eta_a i_a(x, y, z) \tau_{об}, \quad i_k(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_n(x, y, z) \Big|_{s_k},$$

$$i_a(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_{об}(x, y, z) \Big|_{s_k}, \quad \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial z^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial z^2} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_n}{\partial n} \Big|_{s_n} = 0, \quad \varphi_n + F_1(i_a) \Big|_{s_a} = U_n,$$

$$\varphi_n - F_2(i_k) \Big|_{s_k} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_{об}}{\partial n} \Big|_{s_n} = 0, \quad \varphi_{об} + F_1(i_a) \Big|_{s_k} = U_{об}, \quad \varphi_{об} - F_2(i_k) \Big|_{s_a} = 0.$$

Анализ гальванического процесса с реверсом тока как объекта управления показан на рис. 1. На данной схеме ТОУ – технологический объект управления (гальваническая ванна), \bar{U} – вектор управляющих воздействий, $F_{н.ф.}$ – возмущающее воздействие (деталь новой формы), $\delta(x, y, z)$ – выходная величина (распределение толщины покрытия по поверхности детали).

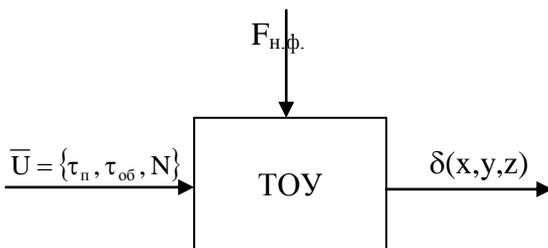


Рис. 1. Анализ гальванического процесса как объекта управления

Необходимо найти вектор управляющих воздействий $\bar{U} = \{\tau_n, \tau_{об}, N\}$, доставляющий минимум критерию неравномерности R при выполнении уравнений связи в виде математической модели и выполнении ограничения $\delta_{\min} \geq \delta_{зад}$.

Значение N^* , при котором будет выполнено условие $\delta_{\min} = \delta_{зад}$, будет вычислено следующим образом:

$$N^* = \left[\frac{\delta_{зад}}{\min_{(x, y, z)} (\delta^+(x, y, z) + \delta^-(x, y, z))} \right].$$

Для оптимизации гальванического процесса по критерию неравномерности, необходимо задать ограничения на длительности прямого и обратного периодов. Анализ литературных источников показал, что традиционный подход к определению границ длительностей прямого и обратного тока заключается в проведении серии экспериментов по нанесению покрытия с определенным шагом изменения длительностей. Длительности, при которых покры-

тие становится рыхлым, либо покрытие не наносится, принимаются как граничные. Такой подход требует существенных временных и материальных затрат. В данной работе граница сверху задается на основании того, что за все время процесса должен совершиться хотя бы один полный период процесса:

$$\tau_{п} + \tau_{об} \leq T_{общ}.$$

Для определения нижней границы длительностей прямого и реверсивного тока необходимо определить предельную частоту гальванического процесса.

Рассмотрим эквивалентную схему электрохимической системы, показанную на рис. 2.

На рис. 2 $R_{гр}$ – активное сопротивление межфазовой границы электрод-электролит (Фарадеево сопротивление), $r_э$ – активное сопротивление электролита, C – ёмкость межфазовой границы электрод-электролит, $U_{вх}$ – входное напряжение, $U_{вых}$ – выходное напряжение. Ёмкость C имеет комплексное сопротивление Z_C .

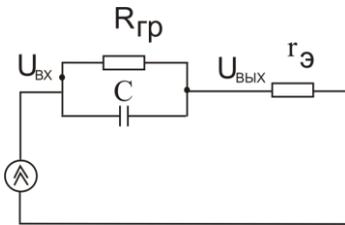


Рис. 2. Эквивалентная схема электрохимической системы

Для нахождения полосы пропускания цепи используем соотношение:

$$K(\omega) = U_{вых} / U_{вх}, \quad (1)$$

где $K(\omega)$ – передаточная функция, ω – циклическая частота процесса.

Выходное напряжение рассчитывается по формуле:

$$U_{вых} = i_{ст} r_э, \quad (2)$$

$$\text{С учётом того, что } \frac{1}{R_{гр}} + \frac{1}{Z_C} = \frac{Z_C + R_{гр}}{R_{гр} \cdot Z_C}$$

получаем:

$$i_{ст} = \frac{U_{вх}}{\frac{R_{гр} \cdot Z_C}{Z_C + R_{гр}} + r_э},$$

где Z_C - комплексное сопротивление ёмкости C .

Следовательно, входное напряжение можно вычислить по формуле:

$$U_{вх} = i_{ст} \left(\frac{R_{гр} Z_C}{R_{гр} + Z_C} + r_э \right). \quad (3)$$

Подставив (2), (3) в (1) получим:

$$K(\omega) = \frac{r_3}{\frac{R_{rp} Z_C}{R_{rp} + Z_C} + r_3}. \quad (4)$$

Реактивное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$Z_C = 1/(i\omega C). \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим:

$$K(\omega) = \frac{r_3 (1 + R_{rp} i\omega C)}{r_3 (1 + R_{rp} i\omega C) + R_{rp}} \quad (6)$$

Выделив в выражении (6) действительную и мнимую части, получим:

$$K(\omega) = \frac{r_3 (R_{rp} + r_3 + R_{rp}^2 r_3 (\omega C)^2)}{(R_{rp} + r_3)^2 + (R_{rp} r_3 \omega C)^2} + i \frac{R_{rp}^2 r_3 \omega C}{(R_{rp} + r_3)^2 + (R_{rp} r_3 \omega C)^2}. \quad (7)$$

Из выражения (7) можно найти модуль передаточной функции, равный:

$$|K(\omega)| = \sqrt{\left(\frac{r_3 (R_{rp} + r_3 + R_{rp}^2 r_3 (\omega C)^2)}{(R_{rp} + r_3)^2 + (R_{rp} r_3 \omega C)^2} \right)^2 + \left(\frac{R_{rp}^2 r_3 \omega C}{(R_{rp} + r_3)^2 + (R_{rp} r_3 \omega C)^2} \right)^2}. \quad (8)$$

Следовательно, построив график зависимости модуля передаточной функции от циклической частоты и найдя значение $\omega_{пр}$, при которой модуль $K(\omega_{пр}) = 0.5$, получим полосу пропускания, верхнее значение которой будет предельной частотой f для гальванического процесса в режиме с реверсированием тока. Таким образом, необходимо найти значения величин R_{rp} , r_3 , C .

Для этого была разработана следующая методика. При подаче ступенчатого воздействия (функции Хевисайда) в режиме стабилизированного тока снимается характеристика зависимости заднего фронта импульса от времени, показанная на рис. 3.

После выключения тока, ёмкость C разряжается на сопротивление R_{rp} от напряжения $(U_{ст} - U(+0))$ до напряжения поляризации $U_{пол}(t)$ за время t , где $U_{ст}$ – напряжение на выходе в момент его отключения, а $U(+0)$ – падение напряжения на активном сопротивлении электролита.

Разрядный ток в этом случае равен:

$$i_C = C \frac{dU_{пол}(t)}{dt} = - \frac{U_{пол}(t)}{R_{rp}}, \quad (9)$$

где $U_{пол}$ – напряжение поляризации.

Преобразуем уравнение (9) к виду

$$- \frac{dU_{пол}}{U_{пол}} = \frac{dt}{CR_{rp}}. \quad (10)$$

Так как в (10) произведение $R_{rp}C$ является постоянным, получаем:

$$t = R_{\text{пр}} C \ln \frac{U_{\text{ст}}}{U_{\text{пол}}(t)} = R_{\text{пр}} C \ln \frac{U(+0)}{U_{\text{пол}}(t)}, \quad (11)$$

где t – время разряда C от напряжения $U(+0)$ до напряжения $U_{\text{пол}}(t)$.

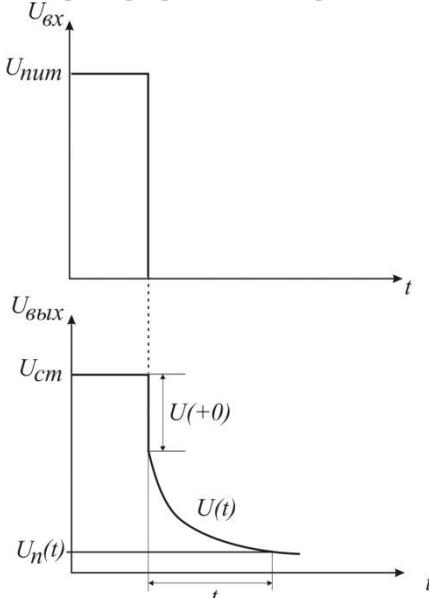


Рис. 3. Теоретический график реакции гальванической системы на единичное воздействие

Из формулы (11) можно найти значение $R_{\text{пр}}C$:

$$R_{\text{пр}} C = \frac{t}{\ln \frac{U(+0)}{U_{\text{пол}}(t)}}. \quad (12)$$

Активное сопротивление электролита равно:

$$r_3 = U(+0) / i_{\text{ст}}.$$

Активное сопротивление межфазовой границы электрод-электролит равно:

$$R_{\text{пр}} = U_{\text{ст}} / i_{\text{ст}} - r_3.$$

Таким образом, получив экспериментальную зависимость $U_{\text{вых}}(t)$ с момента отключения тока, можно найти значения величин $R_{\text{пр}}$, r_3 , C . Подставив найденные значения в (8) при $|K(\omega)| = 0.5$, найдем искомое значение предельной частоты гальванического процесса.

Для используемой в работе электрохимической системы и де-

тали в форме стальной пластины с длиной стороны 30 миллиметров были найдены следующие предельные длительности прямого и реверсивного тока: $\tau_{\text{п}} = 4 \cdot 10^{-3}$ с, $\tau_{\text{обр}} = 9 \cdot 10^{-4}$ с.

Таким образом, получены верхняя и нижняя границы для длительностей прямого и обратного тока. Для поиска оптимальных значений управляющих воздействий был использован метод равномерного поиска. Достоинством этого метода является то, что от целевой функции не требуется дифференцируемости, и она может быть не задана в аналитическом виде.

Разобьем временной интервал на два:

- 1) $\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{об}} \in \left[\frac{1}{f_{\text{пр}}}; 1 \right];$
- 2) $\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{об}} \in [1; T_{\text{общ}}].$

Первый отрезок разобьём на K_1 равных частей. Значение K_1 выбирается исходя из точности нахождения оптимального решения. В точках деления отрезка вычисляются значения критерия неравномерности и путём сравнения находятся значения $\tau_n^m, \tau_{об}^m$, для которых:

$$R(\tau_n^m, \tau_{об}^m) = \min_{1 \leq i \leq K_1} R(\tau_n^i, \tau_{об}^i). \quad (13)$$

Второй отрезок также разделим равномерно на K_2 частей, причем $K_1=K_2$. Аналогично, найдем значения $\tau_n^k, \tau_{об}^k$, для которых:

$$R(\tau_n^k, \tau_{об}^k) = \min_{1 \leq i \leq K_2} R(\tau_n^i, \tau_{об}^i). \quad (14)$$

Оптимальное значение неравномерности будет найдено путём сравнения значений из (13), (14):

$$R_{\min} = R(\tau_n^*, \tau_{об}^*) = \min_{i \in \{m, k\}} R(\tau_n^i, \tau_{об}^i).$$

Таким образом, найдены значения $\tau_n^*, \tau_{об}^*$, при которых достигается минимальная неравномерность покрытия. На языке программирования Delphi 2007 была написана программа, реализующая указанный алгоритм оптимизации гальванического процесса. Входными данными для программы являются предельная частота процесса, рассчитываемая по изложенной методике, количество точек разбиения отрезка ограничения, зависящее от точности расчёта, а также минимальная заданная толщина покрытия. Происходит расчёт времени, необходимого для нанесения покрытия заданной толщины и определяется верхняя граница длительности одного периода. По математической модели рассчитывается равномерность получаемого в итоге покрытия. По завершении поиска оптимальных значений управляющих воздействий программа выдаёт оптимальные значения длительностей включения прямого и обратного тока, количество периодов включения прямого и обратного тока, общее время нанесения покрытия, оптимальное значение критерия равномерности. В результате расчёта для детали в форме стальной пластины с длиной стороны 30 миллиметров были получены следующие оптимальные значения длительностей включения прямого и реверсивного тока: $\tau_n = 10$ мс, $\tau_{об} = 2$ мс. Общее время нанесения покрытия – 2530 с. Минимальная толщина – 20 мкм. Значение критерия неравномерности составило: $R = 0,171$. Время расчёта значений составило 3440 секунд.

Четвертая глава содержит описание измерительно-вычислительного комплекса для нахождения предельной частоты гальванического процесса, а также автоматизированной системы управления процессом нанесения никелевого гальванического покрытия с использованием реверсивного тока.

Как следует из главы 3, для определения предельной частоты гальванического процесса с реверсом тока необходимо определить ряд значений па-

раметров электрохимической системы. Эти значения определяются с помощью анализа реакции электрохимической системы на единичное воздействие. Проблема заключается в том, что для практической реализации описанного метода необходимо высокоскоростное измерительное оборудование с функцией записи данных, синхронизированных по времени, так как время падения напряжения $U(+0)$ очень мало. Кроме того, необходимо устройство для коммутации подаваемого тока с плотностью не менее 5 А/дм^2 и с крутизной фронта отключения, по крайней мере, сопоставимого с крутизной падения напряжения $U(+0)$. На рис. 4 показана структурная схема измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), выполняющего измерения и расчет значений параметров для вычисления предельной частоты процесса.

В качестве измерительного и регистрирующего устройства применялся разработанный двухканальный виртуальный вольтметр с функцией синхронизированной записи данных на базе 12-ти разрядного аналого-цифрового преобразователя ADS7818 с частотой преобразования 500 kHz и разработанное для него консольное приложение на языке Visual C++ для повышения быстродействия программной части измерительной системы.

Для работы ИВК необходимо наличие у ПК двух COM-портов: первый

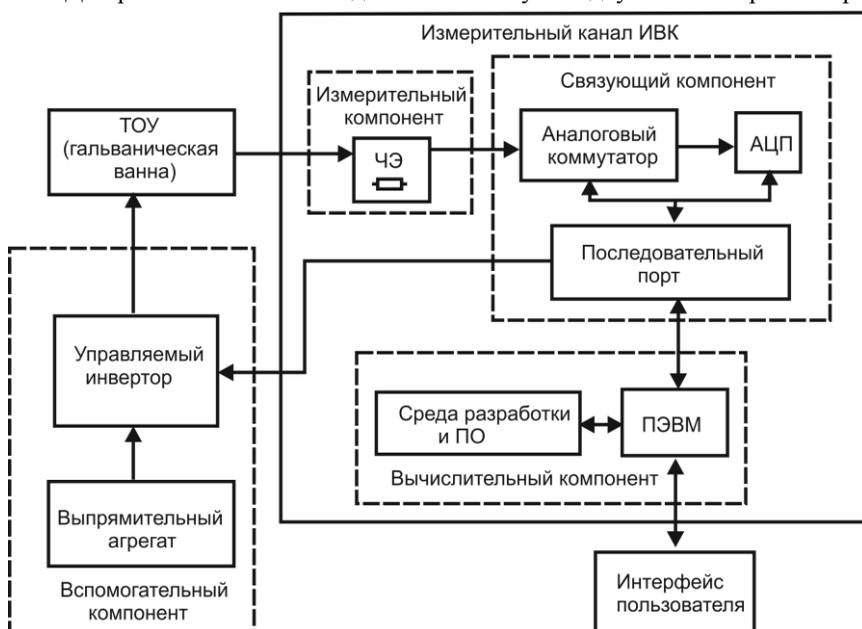


Рис. 4. Структурная схема ИВК

используется для управления мостовым инвертором, второй – для виртуального двухканального вольтметра. Число измерений до отключения мостового инвертора задаётся таким образом, чтобы стабилизатор тока перед отключением успел выйти на режим. Число измерений зависит от типа используемого стабилизатора и частоты измерений.

В данной работе число измерений до выхода стабилизатора на режим равно 7. При помощи вспомогательной программы было определено время выполнения команд QueryPerformanceCounter(), а также одного измерения. Зная это значение времени, а также частоту таймера высокого разрешения было найдено количество измерений после отключения мостового инвертора, а именно 500. Далее происходит включение мостового инвертора и начинается цикл измерений входного и выходного напряжений согласно рис. 2. После выполнения измерений напряжений при включенном источнике стабилизированного питания гальванической ванны происходит отключение мостового инвертора. Затем осуществляется цикл измерений выходного напряжения, соответствующего периоду t на рис. 3. После завершения измерений происходит запись измеренных значений времени и входного (выходного) напряжений в файл.

Данные эксперимента – время и синхронизированные по времени значения $U_{\text{пит}}$ и $U_{\text{ст}}$ – сохраняются в виде табличного файла данных, который затем обрабатывается в программе, имеющей свидетельство о регистрации и написанной в среде пакета Mathcad. В результате, для использовавшейся в данной работе электрохимической системы был получен график, показанный в крупном масштабе на рис. 5.

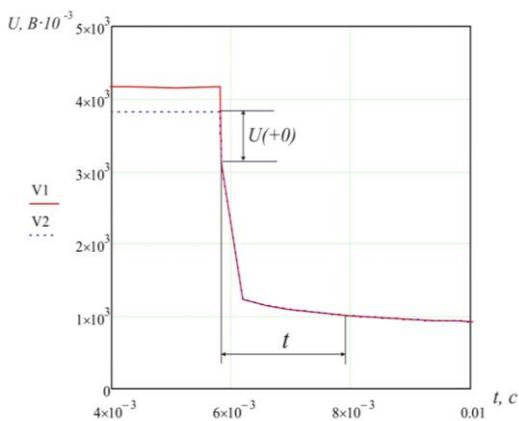


Рис. 5. График зависимости напряжений от времени

Для исследуемой в данной работе электрохимической системы и детали в форме стальной пластины с длиной стороны 30 миллиметров значения параметров составили: $R_{\text{гп}}=9,178 \text{ Ом}$, $r_2=2,012 \text{ Ом}$, $C=204 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$. График зависимости модуля передаточной функции от частоты реверсивного тока показан на рис. 6. По значению модуля передаточной функции равного 0,5 на графике находим начальное приближение частоты процесса.

Для нахождения её точного значения в разработанной программе применяется функция `root()` пакета `Mathcad`. Для исследуемой электрохимической системы значение предельной частоты процесса составило $f_{\text{пр}}=255$ Гц.

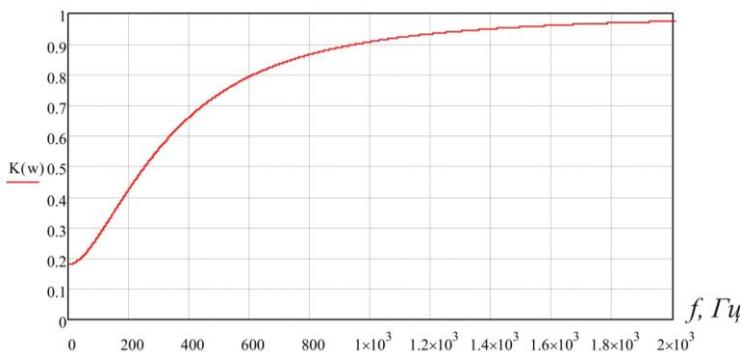


Рис. 6. График зависимости модуля передаточной функции гальванической системы от частоты реверсивного тока

Созданные в процессе исследовательской работы функциональные узлы, такие как мостовой инвертор, двухканальный виртуальный вольтметр, а также программное обеспечение позволяют создать автоматизированную систему управления гальваническим процессом с реверсом тока. Структурная схема такой системы представлена на рис. 7. Её отличие от существующих систем заключается в том, что перед началом цикла нанесения гальванического покрытия на технологический объект управления подаётся единичное воздействие $N(t)$ в виде функции Хевисайда. В результате измеренные величины $U(+0)$, $U(t)$ и t позволяют вычислить предельную частоту процесса. Полученные данные, записанные в файл, указываются оператором системы в разработанной программе в пакете `Mathcad`. Результатом работы системы на первом шаге является значение предельной частоты гальванического процесса $f_{\text{пр}}$. На втором этапе производится поиск оптимальных значений управляющих воздействий $\tau_{\text{п}}^*$, $\tau_{\text{ог}}^*$, N^* для получения наиболее равномерного гальванического покрытия в заданных режиме и условиях. Поиск оптимальных длительностей включения прямого и реверсивного тока $\tau_{\text{п}}^*$, $\tau_{\text{ог}}^*$ происходит по алгоритму, описанному в главе 3. Из условия получения минимальной толщины покрытия не меньше заданной будет найдено также общее количество периодов включения прямого и реверсивного тока N^* . Третий этап работы системы

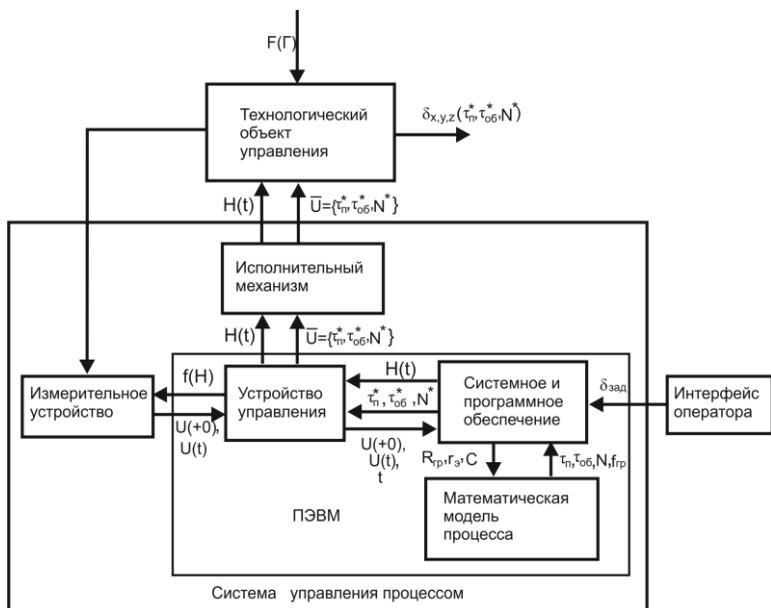


Рис. 7. Структурная схема автоматизированной системы управления гальваническим процессом

заключается в том, что найденные значения $\tau_{п}^*$, $\tau_{об}^*$, N^* оператор системы заносит в управляющую программу и запускает процесс нанесения покрытия. По окончании данного этапа программа завершит работу системы, а процесс нанесения гальванического покрытия будет завершён.

Использование разработанной автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока для нанесения никелевых покрытий дало увеличение равномерности на 18,9% по сравнению с применением только прямого тока.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Поставлена и решена задача оптимизации процесса нанесения гальванического никелевого покрытия для повышения качества гальванического покрытия в соответствии с критерием неравномерности, что позволило уменьшить неравномерность получаемых покрытий на 18,9%.

2. Процесс нанесения гальванических покрытий формализован с точки зрения оптимизации и управления объектом, имеющим частотные свойства, что дало возможность получения аналитических математических моделей

для нахождения предельной частоты импульсов прямого и реверсивного тока.

3. Получена аналитическая математическая модель и разработана методика для определения предельной частоты гальванического процесса с реверсом тока, что позволяет отказаться от экспериментальных методов её нахождения.

4. Разработан алгоритм функционирования измерительно-вычислительного комплекса для определения предельной частоты гальванического процесса с использованием реверсивного тока, что позволило снизить время, затрачиваемое на поиск ограничений для управляющих воздействий в 47,3 раза.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации по списку ВАК

1. Литовка, Ю.В. Диагностика частотных свойств системы оптимального управления гальваническим процессом с реверсированием тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 5. – С. 66 – 71.

2. Литовка, Ю.В. Компьютеризированная система электроосаждения металлов с использованием реверсивного тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 2. – С. 39–42.

3. Литовка, Ю.В. Экспериментальное исследование значений неравномерности и микротвердости никелевого гальванического покрытия при реверсировании тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Вестник ТГТУ. – 2013. – Том 19. – № 1. – С. 177–180.

4. Литовка, Ю.В. Устройство реализации режима реверсирования тока с заданной длительностью импульса / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2013. – № 2(46). – С. 280–286.

5. Литовка Ю.В. Управление гальваническим процессом никелирования в режиме с реверсированием тока с учетом его предельной частоты / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – № 1. – С. 37–44.

Патенты

6. Патент на полезную модель № 137668. Мостовой регулируемый инвертор/ Ю.В. Литовка, С.А. Егоров, А.С. Егоров.

Прочие публикации

7. Литовка, Ю.В. Оптимизация неравномерности никелевого гальванического покрытия с использованием реверса тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV Международ. науч. конф. / Саратов, 2012. – т.8. С. 120-122.

8. Литовка, Ю.В. Исследование зависимости неравномерности и микротвердости никелевого гальванического покрытия от параметров реверсив-

ного тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Совершенствование технологии гальванических покрытий : тез. докл. XV междунар. совещания/ Вятский гос. ун-т. – Киров, 2012. – С. 68-69.

9. Литовка, Ю.В. Компьютеризированная система электроосаждения металлов с использованием реверсивного тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Сборник трудов 3 международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации». Саратов – 2013. – Т.1. – С. 246–248.

10. Литовка, Ю.В. Решение уравнения Лапласа при моделировании процесса нанесения никелевого гальванического покрытия с использованием реверса тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров, В.В. Пэк // Математические методы в технике и технологиях : сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф. / Саратов, 2013. – т.1. С. 16-18.

11. Литовка, Ю.В. Разработка математических моделей для оптимального управления гальваническими процессами / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Математические методы в технике и технологиях : сб. трудов XXIV Междунар. науч. конф. / Саратов, 2011. – т.8. С. 77-79.

12. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2013614666 «Программа оптимального планирования серии экспериментов со многими критериями». Автор: Егоров Андрей Сергеевич. Зарегистрировано 20.05.2013.

13. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011618074 «Программа функционирования восьмиканальной информационно-измерительной системы мониторинга температуры объекта». Авторы: Егоров Сергей Александрович, Егоров Андрей Сергеевич. Зарегистрировано 14.10.2011.

14. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014613575 «Программа для вычисления граничной частоты гальванического процесса в режиме с реверсивным током». Автор: Егоров Андрей Сергеевич. Зарегистрировано: 28.03.2014.

