

Д. С. Соловьев, канд. техн. наук, доц., solovjevdenis@mail.ru,
И. А. Соловьева, ассистент, good.win32@yandex.ru,
Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина

Разработка и исследование системы оптимального управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами

Рассматривается проблема повышения равномерности распределения толщины гальванических покрытий на поверхности обрабатываемых деталей. Проведен анализ управляющих воздействий, оказывающих влияние на равномерность гальванического покрытия, в ходе которого отдано предпочтение использованию ванн со многими анодами. Существующие режимы протекания гальванического процесса в ваннах со многими анодами не находят широкого распространения вследствие конструктивной сложности реализации, возникающей из-за необходимости обеспечения равномерности толщины получаемого покрытия для многономенклатурных производств. Авторами предлагается режим протекания гальванического процесса, в ходе которого отыскивается оптимальное число и размеры анодов, а также сила тока и длительность его протекания через каждый из анодов, которые обеспечивают выравнивание распределения силовых линий электрического поля в электролите между анодами и поверхностью покрываемой детали. Для реализации оптимального управления предлагаемым режимом разработана структура системы управления (математическая модель, поисковый алгоритм, управляющее и исполнительное устройства) с обратной связью по силе тока через поверхность детали и предложен алгоритм ее работы (на базе ПИД закона и релейного управления), практическая реализация которых осуществлена с использованием инструментального программного комплекса промышленной автоматизации CoDeSys V2.3 на языке программирования функциональных блоков FBD. На примере нанесения цинкового покрытия на Z-образную деталь найдено оптимальное управление предлагаемым режимом протекания гальванического процесса. В результате имитационного моделирования найденного режима осуществлена настройка контура регулирования в целях достижения минимума интеграла от квадрата отклонения уставки и продемонстрирована корректность алгоритма работы системы управления с точки зрения получаемого относительного отклонения средней толщины покрытия в 5 %, что сопоставимо с погрешностью современных толщиномеров.

Ключевые слова: имитационное моделирование, система оптимального управления, структурная схема, алгоритм, гальванический процесс, ванна со многими анодами

Введение

Гальванические покрытия используются для изменения свойств поверхности деталей и их защиты от коррозии. Нанесение гальванических покрытий является финишной операцией для производства большинства деталей, от которой напрямую, в конечном счете, зависит качество готовой продукции. Одним из наиболее значимых показателей качества гальванического покрытия является его равномерность. Снижение равномерности покрытия может привести к увеличению расхода металла покрытия и затрачиваемой на гальванический процесс электроэнергии или к браку конечного продукта, что в итоге увеличивает себестоимость производства. По состоянию на 2020 г. в Российской Федерации общий объем производства гальванических покрытий составляет 25...44 тыс. т/год, что при средней толщине 15 мкм и плотности 8 т/м³ для наиболее ти-

пичных покрытий (Cr, Ni, Cu, Zn) обеспечивает совокупную площадь 200...370 млн м²/год обрабатываемой покрытиями поверхности [1]. В связи с вышесказанным представляются актуальными вопросы, связанные с повышением равномерности гальванических покрытий обрабатываемых деталей.

Управляющими воздействиями, оказывающими влияние на равномерность гальванического покрытия, являются: состав электролита (плотность и концентрация компонентов) [2], гидродинамические (перемешивание электролита) [3], температурные [4] и электрические режимы (плотность и распределение тока) [5], а также геометрические факторы (расположение деталей-катодов на подвесе [6], ванны со многими анодами [7], токонепроводящими экранами [8], биполярными электродами [9] и изменение межэлектродного расстояния [10]).

Существует ряд работ, в которых для увеличения равномерности получаемых покрытий

у ванн со многими анодами применяется сочетание нескольких видов воздействий (поиск числа анодов и плотности тока [11], расположения анодов и интенсивности перемешивания электролита [12]). Однако допущения о влиянии анодов только на противоположный участок детали, а не на всю ее поверхность в целом, и сложность в конструктивной реализации (изменение межэлектродного расстояния требует наличия системы точного позиционирования для динамического перемещения анодов в пространстве ванны во время нанесения покрытия) предлагаемых режимов не способствует их широкому распространению. Для устранения вышеописанных недостатков авторами предлагается новый режим протекания гальванического процесса в ваннах со многими анодами. Однако для оптимального протекания предложенного режима необходима разработка и исследование соответствующей системы управления гальваническим процессом.

Целью статьи является разработка и исследование системы оптимального управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами.

Особенности протекания гальванического процесса в ваннах со многими анодами и реализации системы оптимального управления

Суть предлагаемого режима заключается в следующем [13, 14]: аноды размещаются на электроизолированных участках стержня (электроизоляция достигается путем использования диэлектрической муфты с внутренней резьбой, а также участков штанги с наружной резьбой), снабженных индивидуальными элементами токоподвода, кабель от которых подключается к выпрямительному агрегату через устройство, позволяющее устанавливать различную силу тока и длительность его протекания для каждого анода при одновременном начале их работы. Число и размеры анодов могут изменяться в зависимости от формы, размеров и числа одновременно обрабатываемых деталей.

Система с обратной связью предлагается в качестве принципа управления гальваническим процессом в ваннах со многими анодами. Структурная схема предлагаемой системы управления приводится на рис. 1.

Входными величинами X являются: информация о конфигурации S_c поверхности детали, размерах (длине L_x , ширине L_y и высоте L_z) гальванической ванны, а также электрохимический эквивалент $\mathcal{E}$ и плотность ρ металла по-

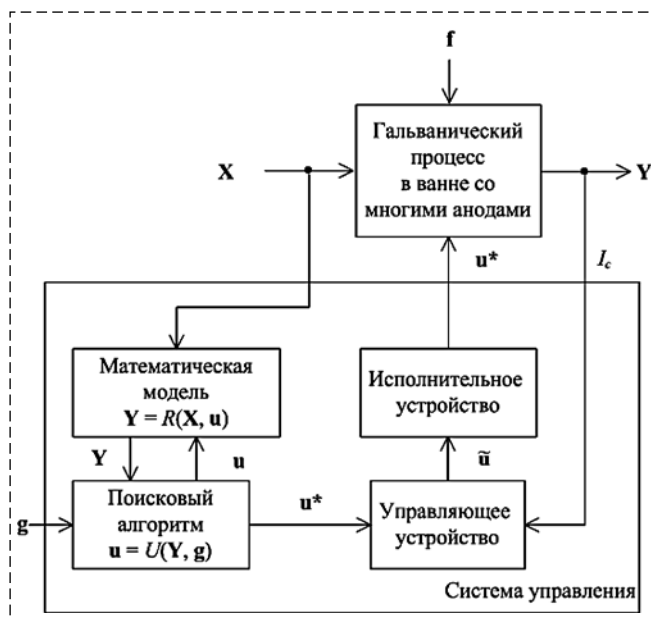


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Fig. 1. Structural scheme of the control system

крытия, кислотность pH и состав компонентов $C_1, C_2, \dots$ электролита, его уровень H и температура t .

Множество выходных значений Y описывает распределение толщины покрытия $\delta(x, y, z, \tau)$ по поверхности детали S_c .

Возмущающими воздействиями f являются: наличие примесей Pr в электролите из-за недостаточной промывки деталей от моющих средств, химических веществ, растворителей или масел; дефекты D поверхности детали, унос G электролита из ванны поверхностью детали, испарение электролита E , прерывание электрического контакта B во время электролиза, а также опыт O оператора-гальваника. Данные воздействия имеют случайный характер, однако их негативное влияние на гальванический процесс можно уменьшить или предотвратить, если уделить должное внимание выбору оборудования и надлежащему уходу за ним, в том числе своевременному выполнению ремонтных работ, периодическому анализу состава электролитов, входной подготовке деталей (струйная обработка, промывка, обезжиривание и травление для устранения дефекта поверхности), а также повышению квалификации и переподготовке оператора-гальваника.

Управляющими воздействиями u являются: число анодов N , их конфигурация $S_{a_1}, \dots, S_{a_n}, \dots, S_{a_N}$, сила тока $I_{a_1}(\tau), \dots, I_{a_n}(\tau), \dots, I_{a_N}(\tau)$ и длительность работы $\Delta\tau_{a_1}, \dots, \Delta\tau_{a_n}, \dots, \Delta\tau_{a_N}$ для каждого анода.

Для расчета выходного вектора Y (толщины покрытия $\delta(x, y, z, \tau)$ на поверхности детали S_c)

применяется математическая модель, которая использует информацию о значениях входных величин $\mathbf{X}$ и управляющих воздействий $\mathbf{u}$.

Задача оптимального управления формулируется следующим образом.

Для заданного набора входных величин $\mathbf{X}$ необходимо найти такие значения управляющих воздействий $\mathbf{u}^*$, которые обеспечивают для обрабатываемой конфигурации детали S_c максимальное значение критерия равномерности покрытия:

$$R = \frac{1}{\|S_c\|} \int_{S_c} \frac{\delta^{\min}(\tau)}{\delta(x, y, z, \tau)} dS_c \rightarrow \max, \quad (1)$$

с учетом ограничений на значения управляющих воздействий:

$$\sum_{n=1}^{N^*} \|pr_{xz}(S_{a_n}^*)\| \leq 2(L_x - 2l_x^{zad})(L_z - 2l_z^{zad}); \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^{N^*} I_{a_n}^*(\tau) \leq I^{\max}; \quad (3)$$

$$T = \max_{n=1, \dots, N^*} (\Delta\tau_{a_n}^*) \leq T^{set}, \quad (4)$$

где $I^{\max}$ — максимальная сила тока, поддерживаемая выпрямительным агрегатом; $\|pr_{xz}(S_{a_n}^*)\|$ — площадь проекции поверхности n -го анода на плоскость, проходящую через длину L_x и высоту L_z гальванической ванны; l_x^{zad} , l_z^{zad} — минимально допустимые расстояния между анодами и боковыми стенками ванны, а также анодами и верхним краем/дном ванны; T^{set} — предельная длительность гальванического процесса.

Ограничение (2) вытекает из физического смысла задачи: число анодов найденного размера не может превышать размеры стенок (как правило, аноды располагаются с двух сторон) гальванической ванны, возле которых они размещаются. Ограничение (3) определяется возможностями используемого выпрямительного агрегата. Ограничение (4) позволяет интенсифицировать гальванический процесс, чтобы не допустить снижения производительности технологической линии в целом.

Толщина покрытия δ на поверхности катода S_c в точке с координатами (x, y, z) за время электроосаждения T отыскивается согласно закону Фарадея:

$$\delta(x, y, z, T) = \frac{\vartheta}{\rho} \int_0^T i_c(x, y, z, \tau) \eta(t(\tau), i_c(x, y, z, \tau), pH, C_1, C_2, \dots) d\tau, \quad (5)$$

где η — выход металла по току.

Плотности анодного i_a и катодного i_c токов рассчитываются по закону Ома:

$$i_{a_n}(x, y, z, \tau) = \chi \frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_{a_n}}, \quad (6)$$

$$i_c(x, y, z, \tau) = -\chi \frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_c}, \quad (7)$$

где φ — потенциал электрического поля в момент времени τ в пространстве V_{el} электролита; $\partial \varphi / \partial \vec{n}$ — производная по направлению для функции потенциала; χ — удельная электропроводность электролита.

Дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа задает распределение потенциала φ :

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\varepsilon_0 c^2}{\mu \chi} \left[\frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] \Big|_{V_{el}}, \quad (8)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость электролита; c — скорость света в вакууме; ε_0 — электрическая постоянная.

На границе "электролит—изолятор" имеется условие:

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_{ins}} = 0, \quad (9)$$

где S_{ins} — поверхность изолятора (стенок гальванической ванны).

На границе "электролит— n -й анод" имеется набор условий:

$$\varphi(x, y, z, \tau) + F_a(i_{a_n}(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_{a_n}} = U(\tau), \quad (10)$$

$$n = 1, \dots, N,$$

где U — напряжение питания ванны; F_a — анодная поляризация.

На границе "электролит—катод" имеется условие:

$$\varphi(x, y, z, \tau) - F_c(i_c(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_c} = 0, \quad (11)$$

где F_c — катодная поляризация.

Для уравнения (9) задается начальное условие:

$$\varphi(x, y, z, 0) = \varphi_0(x, y, z), \quad (12)$$

где φ_0 — начальное распределение потенциала.

Поскольку аноды работают в режиме одновременного запуска в начале электролиза согласно соответствующей длительности $\Delta\tau_{a_n}$

протекания силы тока, по истечении которой ток через n -й анод больше не протекает до конца нанесения покрытия, выражение, определяющее силу тока, имеет вид

$$I_{a_n}(\tau) = \begin{cases} 0, \tau > \Delta\tau_{a_n}; \\ I_{a_{n_0}} + \frac{I_{a_{n_1}} - I_{a_{n_0}}}{\Delta\tau_{a_n}} \tau, \tau \leq \Delta\tau_{a_n}, \end{cases} \quad (13)$$

где $I_{a_{n_0}}, I_{a_{n_1}}$ — значения силы тока через n -й анод в моменты времени $\tau = 0$ и $\tau = \Delta\tau_{a_n}$.

Таким образом, математическая модель процесса R для связи $\mathbf{Y}$ с $\mathbf{X}$ и $\mathbf{u}$ базируется на законах теоретической электрохимии (Фарадея (5), Ома (6)—(7) и распределения потенциала (8)) и отличается уравнениями, учитывающими число и размеры анодов (10), силу тока, протекающего через них, и длительность их работы (13).

Нахождение оптимальных значений управляющих воздействий $\mathbf{u}^*$ осуществляет поисковый алгоритм U , использующий информацию о расчетном значении выходной величины $\mathbf{Y}$ и совокупности ограничений $\mathbf{g}$, имеющей следующий вид:

$$\mathbf{g} = \{I_x^{zad}, I_z^{zad}, I^{\max}, T^{set}, \varepsilon\}, \quad (14)$$

где ε — точность решения задачи оптимального управления.

Нахождение оптимального управления осуществляется путем сведения задачи оптимального управления к последовательности задач безусловной оптимизации с последующим применением метода штрафных функций, подразумевающим использование нового критерия на основе (1) и суммы штрафа за нарушение ограничений (2)—(4):

$$\begin{aligned} \Psi = & \frac{1}{\|S_c\|} \int_{S_c} \frac{\delta^{\min}(\tau)}{\delta(x, y, z, \tau)} dS_c - \\ & - \sigma [\max(0, 2(L_x - 2I_x^{zad})(L_z - 2I_z^{zad}) - \\ & - \sum_{n=1}^N \|pr_{xz}(S_{a_n})\|) + \max_{n=1 \dots N} \left(0, I^{\max} - \sum_{n=1}^N I_{a_n}(\tau) \right) + \\ & + \max(0, T^{set} - T)] \rightarrow \max, \end{aligned} \quad (15)$$

где σ — коэффициент штрафа.

Использование в (15) внешнего штрафа в виде функции срезки обусловлено возможностью начала поиска экстремума из произвольной точки. В качестве алгоритма решения последовательности задач безусловной оптимизации (15) целесообразно использовать ов-

ражный метод, выбор которого обуславливается общеизвестным фактом, что штрафные функции создают рельеф критерия в виде "оврага" с крутыми краями вдоль каждой границы области ограничений.

После решения задачи оптимального управления, в связи с тем, что загрузка требуемого числа анодов заданных площадей осуществляется до начала электролиза, за время которого данные значения не изменяются, найденное число анодов N^* , их конфигурация $S_{a_1}^*, \dots, S_{a_n}^*, \dots, S_{a_N}^*$ непосредственно передаются в управляющее устройство. При этом на объекте управления осуществление загрузки анодов выполняется ручным или механизированным способом с использованием транспортной системы, которая содержит транспортеры, перевозящие партии деталей по заданным траекториям между каждой из технологических ванн. Транспортеры оснащены приводами, обеспечивающими плавное движение и точное позиционирование.

Поскольку непосредственное измерение толщины покрытия $\delta(x, y, z, \tau)$ на поверхности детали S_c в ходе гальванического процесса невозможно, то управление по обратной связи будет осуществляться через деталь (катод) для силы тока, значение которой, согласно закону Фарадея, оказывает непосредственное влияние на толщину получаемого покрытия.

Управляющее устройство представляет собой программируемый логический контроллер, который реализует алгоритм логико-командного управления режимом протекания гальванического процесса. Исполнительное устройство содержит датчик силы тока, а также совокупность регуляторов силы тока и контакторов.

Алгоритм работы системы оптимального управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами

В управляющем устройстве вычисляется оптимальное значение силы тока через катод $I_c^*(\tau)$ как сумма токов, прошедших через работающие аноды:

$$I_c^*(\tau) = \sum_{n=1}^{N^*} I_{a_n}^*(\tau). \quad (16)$$

Для сравнения $I_c^*(\tau)$ и $I_c(\tau)$ посредством использования сумматора с инвертированным входом рассчитывается отклонение:

$$\Delta_I(\tau) = I_c^*(\tau) - I_c(\tau), \quad (17)$$

где $I_c(\tau)$ — измеренное значение силы тока через деталь в момент времени τ .

Отклонение (17) представляет собой разницу между измеренным и оптимальным значениями силы тока через катод. Если отклонение равно нулю, то требуемое значение силы тока через катод достигнуто, т. е. $I_c(\tau)$ совпадает с $I_c^*(\tau)$. Для сравнения текущего момента времени τ от начала электролиза с длительностями работы анодов рассчитывается вектор отклонений:

$$\Delta_\tau(\tau) = \{\Delta\tau_{a_1}^* - \tau, \dots, \Delta\tau_{a_n}^* - \tau, \dots, \Delta\tau_{a_N}^* - \tau\} \quad (18)$$

также с использованием сумматора с инвертированным входом.

Полученные отклонения (17) и (18) обрабатываются в целях формирования скорректированного набора значений $\tilde{\mathbf{u}}$ для исполнительного устройства, реализующего оптимальное воздействие $\mathbf{u}^*$.

Рассмотрим состав $\tilde{\mathbf{u}}$ для исполнительного устройства. Большинство операций промышленной автоматизации в замкнутом контуре используют ПИД регуляторы. Применение ПИД регулятора является одним из наиболее эффективных средств для достижения контроля практически в любом измеряемом и регулируемом состоянии. Как регулятор обратной связи он обеспечивает управляемый выход на желаемом уровне. Для минимизации отклонения (17) используется ПИД регулятор, выходной сигнал которого рассчитывается согласно формуле

$$d_{\Sigma I}(\tau) = k_P \Delta_I(\tau) + \frac{1}{T_N} \int_0^\tau \Delta_I(\xi) d\xi + T_V \frac{d\Delta_I(\tau)}{d\tau}, \quad (19)$$

где k_P — пропорциональный коэффициент; T_N , T_V — постоянные интегрирования и дифференцирования.

ПИД регулятор содержит в себе пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие. Для каждого процесса эти составляющие варьируются, чтобы получить оптимальный отклик на управление. Если регулятор настроен правильно, то его выход будет следовать изменяемой уставке с меньшими колебаниями.

Выходной сигнал (19) служит коррекцией уставки значения силы тока, проходящей через n -й работающий анод:

$$I_{a_n}^{PID}(\tau) = I_{a_n}^*(\tau) + d_{\Sigma I}(\tau) I_{a_n}^*(\tau) / \sum_{n=1}^{N^*} I_{a_n}^*(\tau). \quad (20)$$

Работа n -го анода определяется на основе соответствующего значения отклонения (18) на базе кусочно-заданной функции вида

$$\forall n = 1, \dots, N^*: w_{\tau_{a_n}}(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\Delta\tau_{a_n}^* - \tau) \geq 0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (21)$$

где 1 — анод подключен к выпрямительному агрегату; 0 — анод отключен от выпрямительного агрегата.

Сигнал управления $\tilde{\mathbf{u}}$ для исполнительного устройства включает в себя следующие компоненты:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \{I_{a_1}^{PID}(\tau), \dots, I_{a_n}^{PID}(\tau), \dots, \dots, I_{a_N}^{PID}(\tau), w_{\tau_{a_1}}(\tau), \dots, w_{\tau_{a_n}}(\tau), \dots, w_{\tau_{a_N}}(\tau)\}. \quad (22)$$

Рассмотрим основные шаги алгоритма работы управляющего устройства предлагаемой системы для формирования компонентов сигнала (22).

1. Ввод исходных данных, содержащих сведения о значениях оптимального управления $\mathbf{u}^*$, коэффициенты k_P и постоянных T_N , T_V для работы ПИД регулятора и временного шага $d\tau$.
2. Инициализация начального значения длительности процесса $\tau = 0$.
3. Считывание текущего значения $I_c(\tau)$.
4. Определение отклонения $\Delta_I(\tau)$ по (18) и расчет работы n -го анода $w_{\tau_{a_n}}(\tau)$ согласно (21).
5. Определение уставки $I_c^*(\tau)$ согласно (16), отклонения $\Delta_I(\tau)$ по формуле (17) и вычисление $d_{\Sigma I}(\tau)$ согласно закону (19) для коррекции силы тока $I_{a_n}^{PID}(\tau)$ через n -й анод с использованием соотношения (20).
6. Формирование на основе компонентов, рассчитанных в пунктах 4 и 5, сигнала управления $\tilde{\mathbf{u}}$ согласно (22) для исполнительного устройства.
7. Проверка истинности выражения

$$\tau < \max_{n=1, \dots, N^*} (\Delta\tau_{a_n}^*), \quad (23)$$

соответствующего завершению гальванического процесса. Если выражение истинно, то осуществляется переход к пункту 8, иначе алгоритм завершает работу.

8. Увеличение длительности $\tau = \tau + d\tau$ и переход к пункту 3.

Поиск оптимального управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами

Осуществим поиск оптимального управления гальваническим процессом цинкования

для Z-образного катода с площадью поверхности $S_c = 900 \text{ см}^2$ в прямоугольной гальванической ванне размерами: длина $L_x = 30 \text{ см}$, ширина $L_y = 50 \text{ см}$ и высота $L_z = 40 \text{ см}$. Ванна заполнена на уровень $H = 32 \text{ см}$ цинкатым электролитом с температурой $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, кислотностью $pH = 8$ и концентрацией основных компонентов электролита, г/л: $C_1 (\text{ZnO}) - 12$, $C_2 (\text{NaOH}) - 100$.

Значения ограничений (14), используемых при решении задачи поиска оптимального управления, представлены ниже.

I_x^{ad} , см.	2,5
I_z^{ad} , см.	2,5
I^{max} , А	20
T^{set} , с	2400
ε	0,00001

В результате решения задачи оптимального управления были получены значения управляющих воздействий, представленные ниже.

N , шт.	4
$S_{a_1} = S_{a_2} = S_{a_3} = S_{a_4}$, см ²	367,5
$I_{a_1}(\tau)$, А.	$6,136 - 0,0011\tau$
$I_{a_2}(\tau)$, А.	$3,937 + 0,0008\tau$
$I_{a_3}(\tau)$, А.	$6,736 - 0,0010\tau$
$I_{a_4}(\tau)$, А.	$3,627 + 0,0013\tau$
$\Delta\tau_{a_1}$, с	1100
$\Delta\tau_{a_2}$, с	2400
$\Delta\tau_{a_3}$, с	1000
$\Delta\tau_{a_4}$, с	2200

Найденное число и размеры анодов располагаются в пространстве гальванической ванны согласно рис. 2.

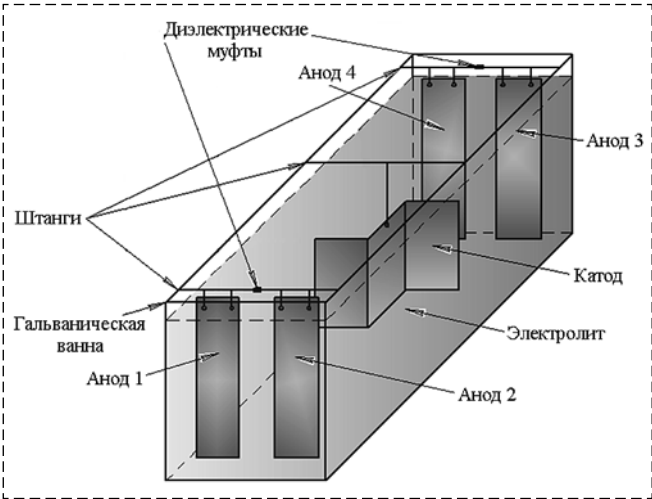


Рис. 2. Схема расположения анодов в гальванической ванне
Fig. 2. Scheme of anodes arrangement in an electroplated bath

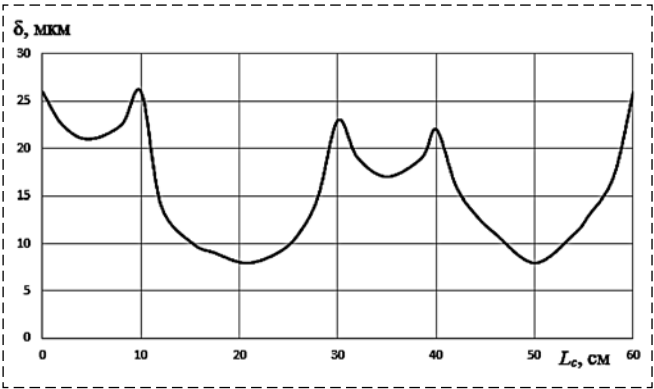


Рис. 3. Развертка сечения толщины покрытия по длине катода
Fig 3. Unfolded section of the coating thickness along the cathode length

Найденное оптимальное управление обеспечивает распределение толщины цинкового покрытия $\delta(x, y = L_y/2, z, \tau = T)$ на поверхности катода S_c , развертка по длине L_c которой для сечения плоскостью, параллельной дну гальванической ванны, представлена на рис. 3.

Данное распределение соответствует значениям критерия равномерности $R = 0,53499$ и средней толщины покрытия $\bar{\delta}_и = 17,565 \text{ мкм}$.

Имитационное моделирование работы системы оптимального управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами

При проектировании системы оптимального управления необходимо осуществить имитационное моделирование ее работы в целях обнаружения и устранения возможных ошибок для используемого в ней алгоритма. При отсутствии этапа имитационного моделирования некорректность ее алгоритма может быть выявлена только в процессе ввода в эксплуатацию, что значительно увеличивает стоимость и время подготовки объекта управления к использованию. Кроме того, в сложных системах при наладке велика вероятность обнаружения не всех ошибок, что приведет к ненадлежащему выполнению системой управления своих задач в процессе функционирования.

Имитационное моделирование работы системы оптимального управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами осуществим с использованием инструментального программного комплекса промышленной автоматизации *CoDeSys V2.3* на языке программирования функциональных

блоков *FBD*, структурная схема которого показана на рис. 4.

Рассмотрим принцип работы структурной схемы для имитационного моделирования. Для запуска процесса используется триггер *RS1*, длительность работы которого определяется входным значением *duration* таймера *Timer1*. Выход *Q1* триггера *RS1* запускает часы *Clock1* для отсчета моментов времени протекания процесса. Выход *tau* часов *Clock1* применяется в блоках *CurrentAnode1*—*CurrentAnode4*, в которых задаются найденные оптимальные функции изменения силы тока через аноды 1—4, а также в блоках температуры *Temperature1* и толщины покрытия *Electrodeposition1*.

Блок *Temperature1* формирует температуру согласно формуле

$$t(\tau) = 25 + \lambda_1 \sin\left(\lambda_2 \frac{\pi \tau}{180}\right), \quad (24)$$

где λ_1 , λ_2 — коэффициенты растяжения/сжатия функции по ординате и абсциссе соответственно.

В данной схеме реализуется только изменение температуры t , потому что только оно происхо-

дит непосредственно за время гальванического процесса. Изменение уровня H электролита происходит только при загрузке детали большего/меньшего объема. Изменение концентрации компонентов C_1 , C_2 , ... электролита в процессе электролиза незначительное ввиду пополнения ионов металла с поверхности растворяющихся анодов. Изменение кислотности pH электролита обусловлено разбавлением раствора водой при загрузке новых деталей и также не изменяется в ходе гальванического процесса. Размеры L_x , L_y и L_z гальванической ванны, а также электрохимический эквивалент $\mathcal{E}$ и плотность ρ металла покрытия изменяются только при замене ванны или электролита и анодов соответственно.

Полученное значение через выход *temperature* передается на одноименный вход блока *Electrodeposition1*. Выходами блока *Electrodeposition1* являются сила тока, проходящего через катод *cathodecurrent*, и среднее значение толщины покрытия *thickness*.

Выходы *current1*—*current4* в блоках *CurrentAnode1*—*CurrentAnode4* используются для расчета суммарной силы тока *anodecurrent* согласно (16) посредством элементов *ADD* (сложение), выходы *reset1*—*reset4* сигнализируют о текущем

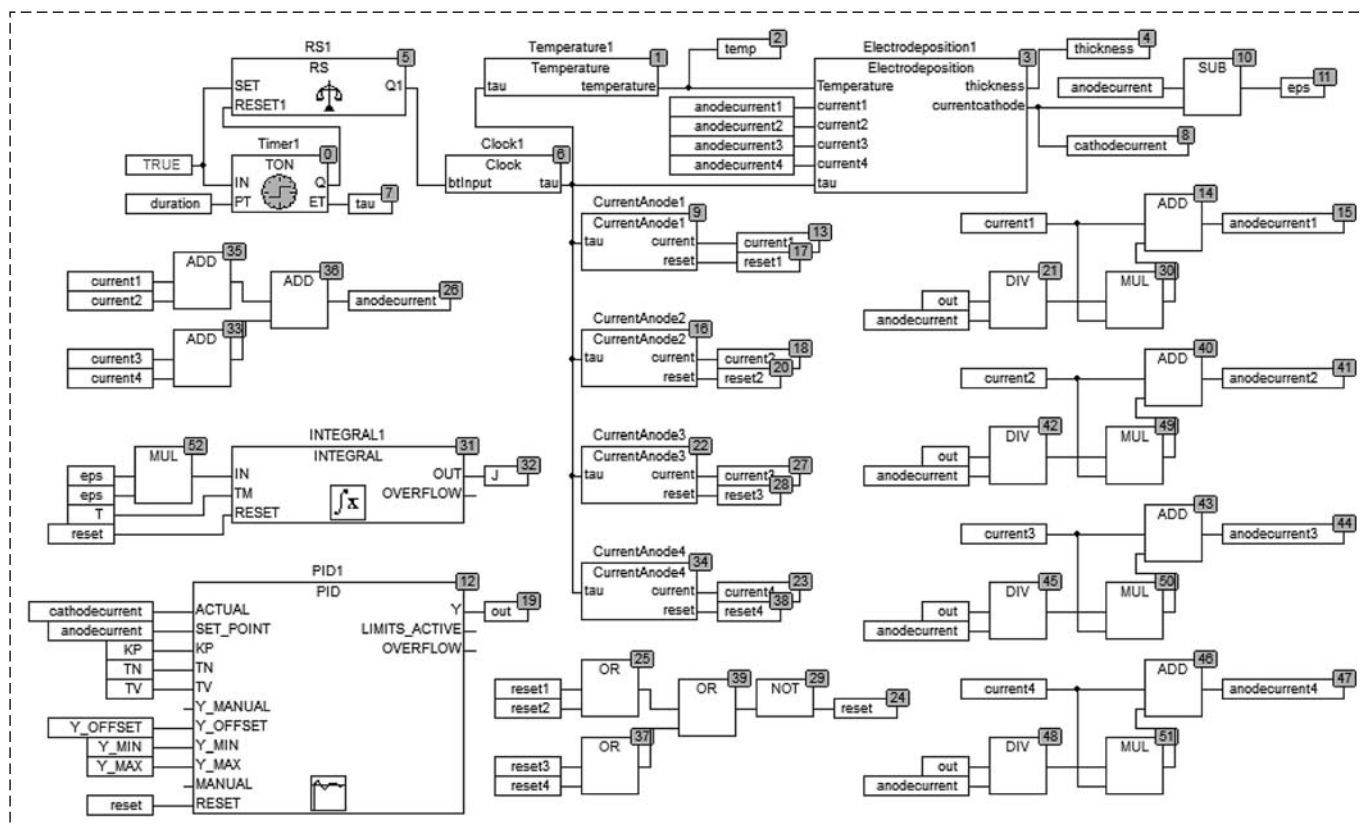


Рис. 4. Структурная схема имитационного моделирования работы системы управления в среде *CoDeSys V2.3* на языке *FBD*
Fig. 4. Simulation modeling structural scheme of the control system operation in the *CoDeSys V2.3* in the programming language *FBD*

состоянии каждого анода (работает или отключен) по формуле (21). Согласно значениям *anodecurrent* и *cathodecurrent* посредством блока *SUB* (вычитание) определяется значение отклонения *eps* по формуле (17).

Для уменьшения значения отклонения *eps* используется ПИД регулятор *PID1* согласно соотношению (19). Запуск/отключение ПИД регулятора *PID1* задается посредством входа *reset*, определяемого совокупностью операций элементов *OR* (логическое "ИЛИ") и *NOT* (логическое "НЕ") со значениями *reset1—reset4*. Выходное значение *out* ПИД регулятора *PID1* используется для коррекции уставок найденных значений силы тока через аноды. Для этого значение *out* уменьшается пропорционально отношению оптимальной силы тока через конкретный анод *current1—current4* к суммарной силе тока через все аноды *anodecurrent* посредством элементов *MUL* (умножение) и *DIV* (деление). Полученные значения складываются элементами *ADD* с первоначальными (оптимальными) значениями силы тока *current1—current4*, формируя скорректированные значения силы тока *anodecurrent1—anodecurrent4* через аноды согласно выражению (20). Полученные значения выходов *anodecurrent1—anodecurrent4* подаются на вход блока *Electrodeposition1*. Процесс управления продолжается, пока работает хотя бы один анод (значение *reset* ложно) или не закончится длительность гальванического процесса *duration* и не произойдет отключение триггера *RS1* таймером *Timer1*.

Оценку качества регулирования осуществим с использованием интеграла отклонения (19) в квадрате:

$$J = \int_0^T d_{\Sigma I}^2(\tau) d\tau, \tag{25}$$

расчет которого реализуется с помощью элемента *Integral1*.

Настройку значений пропорционального коэффициента *k_p* и постоянных интегрирования *T_N* и дифференцирования *T_V* в ПИД регуляторе (19) выполним согласно минимуму среднего значения интеграла (25) согласно формуле

$$\bar{J} = \frac{1}{N_{\lambda_1} N_{\lambda_2}} \sum_{r=1}^{N_{\lambda_1}} \sum_{s=1}^{N_{\lambda_2}} J_{r,s} \rightarrow \min, \tag{26}$$

где *N_{λ₁}*, *N_{λ₂}* — число значений, которые принимают коэффициенты *λ₁* и *λ₂* соответственно; *r*, *s* — индексы.

Результаты имитационного моделирования работы системы оптимального управления и их анализ

Для *N_{λ₁}* = *N_{λ₂}* = 3 при значениях коэффициентов 0,5; 1 и 2 получено минимальное среднее значение *J̄* = 9,987 А²·с, соответствующее значениям интегралов (25), представленным в табл. 1. Минимальное среднее значение *J̄* обеспечивается значением пропорционального коэффициента *k_p* = 0,112 и постоянных интегрирования *T_N* = 0,049 с и дифференцирования *T_V* = 0,062 с в ПИД регуляторе.

На рис. 5 продемонстрирована скорректированная *I_{а_n}^{PID}(τ)* сила тока через аноды 1—4 соответственно при значениях коэффициентов *λ₁* = 1 °С и *λ₂* = 1 с^{−1}.

Из табл. 1 можно сделать вывод, что растяжение по ординате колебательного процесса изменения температуры электролита вносит больший вклад в интеграл отклонения в квадрате, чем растяжение по абсциссе, а при сжатии как по абсциссе, так и по ординате значение интеграла минимальное.

Из рис. 5 следует, что сила тока через аноды 1 и 3 больше, а длительность их работы меньше, чем для анодов 2 и 4, что объясняется

Таблица 1
Table 1

Значения интегралов квадратов отклонения при различных коэффициентах *λ₁* и *λ₂*
The values of the squared deviation integrals at various coefficients λ₁ and λ₂

Коэффициент <i>λ₁</i> , °С	Коэффициент <i>λ₂</i> , с ^{−1}		
	0,5	1	2
0,5	7,501	7,273	8,164
1	8,812	8,755	10,486
2	8,909	11,087	18,898

Таблица 2
Table 2

Значения средней толщины покрытия в конце процесса при различных коэффициентах *λ₁* и *λ₂*
The values of the average coating thickness at the end of the process at various coefficients λ₁ and λ₂

Коэффициент <i>λ₁</i> , °С	Коэффициент <i>λ₂</i> , с ^{−1}		
	0,5	1	2
0,5	18,352	18,386	18,366
1	18,362	18,353	18,343
2	18,385	18,363	18,377

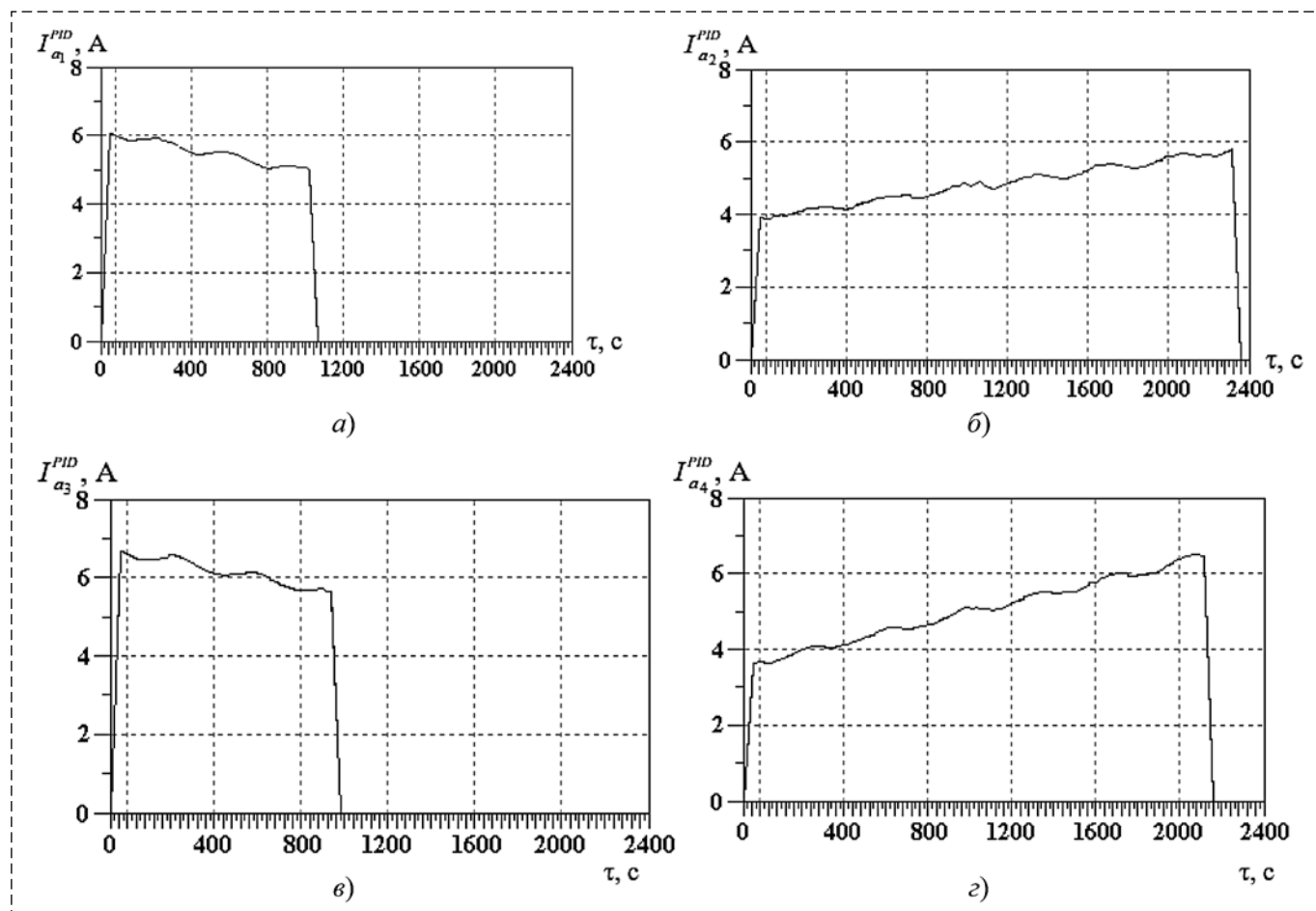


Рис. 5. Скорректированная сила тока через аноды 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г)
Fig. 5. Corrected current through anodes 1 (a), 2 (б), 3 (в) and 4 (г)

разницей в межэлектродных расстояниях анодов и противолежащих частей катода, причем соответствующее возрастание/убывание силы тока вызвано отличающейся скоростью роста толщины покрытия на них в случае, когда изделие имеет выступы.

На рис. 6 продемонстрирована измеренная сила тока $I_c(\tau)$ через катод, а на рис. 7 — рост

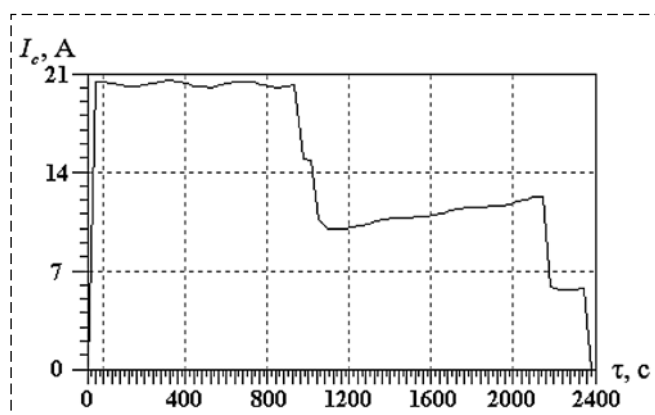


Рис. 6. Измеренная сила тока через катод
Fig. 6. Measured current through the cathode

среднего значения толщины покрытия на поверхности катода при значениях коэффициентов $\lambda_1 = 1^\circ\text{C}$ и $\lambda_2 = 1\text{ c}^{-1}$.

Значения средней толщины покрытия $\bar{\delta}_m$ в конце процесса при значениях коэффициентов 0,5; 1 и 2 представлены в табл. 2.

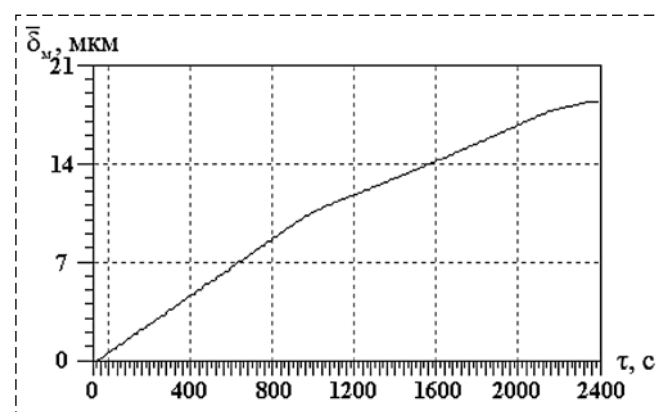


Рис. 7. Рост среднего значения толщины покрытия на поверхности катода
Fig. 7. The growth of the coating thickness average value on the cathode surface

На рис. 7 видно, что скорость роста среднего значения толщины покрытия на поверхности катода замедляется при завершении длительно-сти работы каждого из анодов, соответствующие моменты времени которых уменьшают силу тока через поверхность катода согласно рис. 6.

Из табл. 2 следует, что относительное отклонение средней толщины покрытия $\bar{\delta}_m$ с учетом колебания температуры электролита и без колебания $\bar{\delta}_и$ (идеальный процесс) не превышает 5 %, что сопоставимо с погрешностью современных толщиномеров и свидетельствует о качественной настройке ПИД регулятора и корректности работы предложенного алгоритма управления.

Заключение

Управление силой тока и длительностью его протекания в гальванических процессах в ваннах с оптимальным числом анодов является эффективным способом увеличения равномерности распределения толщины получаемого покрытия. В таких процессах увеличение равномерности толщины покрытия достигается путем выравнивания распределения силовых линий электрического поля в электролите между анодами и поверхностью покрываемой детали. Реализация системы управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами возможна с использованием принципа обратной связи для силы тока через катод, соответствующий алгоритм работы которой базируется на ПИД законе (для регулирования силы тока через аноды) и релейном управлении (для регулирования длительности протекания тока через аноды). Имитационное моделирование работы системы оптимального управления гальваническими процессами в ваннах со многими анодами при динамической коррекции значения уставки силы тока в условиях колебательного изменения температуры электролита продемонстрировало корректность работы данного алгоритма управления. Использование предлагаемой системы управления позволит достигнуть не только получения качественной (в плане равномерности покрытия) и воспроизводимой обработки деталей, но и повышения производительности гальванического процесса в целом (отсутствие покрытия превышающей толщины позволит избежать дополнительной механической обра-

ботки детали), а также минимизации перерасхода металла покрытия.

Список литературы

1. Винокуров Е. Г., Бурухина Т. Ф., Гусева Т. В. Гальваническое производство в России: оценочный подход, задачи повышения ресурсной и экологической эффективности // *Технология металлов*. 2020. № 7. С. 2—6.
2. Деулин Б. И. Ионнообменная установка для экспресс-анализа концентрации ионов в растворах электролитов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2013. № 1 (104). С. 31—33.
3. Асеева А. В., Попов А. Н. Эжекторное перемешивание растворов в гальванотехнике // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2004. Т. 12, № 1. С. 44—49.
4. Милованов И. В., Васильев С. А. Выбор и управление температурными режимами в гальванических ваннах // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2002. Т. 8, № 3. С. 473—478.
5. Варенцов В. К., Юсин С. И., Варенцова В. И. Влияние плотности тока и скорости протока раствора на динамику осаждения меди на электроды из углеродных волоконистых материалов // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2009. Т. 17, № 4. С. 349—358.
6. Баников А. А., Литовка Ю. В. Оптимальное размещение катодов в автоматизированной системе управления гальванической ванной // *Вести высших учебных заведений Черноморья*. 2021. № 3 (65). С. 3—9.
7. Дьяков И. А. Система управления выпрямителем многоанодных гальванических ванн // *Радиотехника*. 2010. № 12. С. 52—54.
8. Пчелинцева И. Ю., Литовка Ю. В. Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токопроводящим экраном // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022. Т. 23, № 4. С. 188—196.
9. Соловьев Д. С., Као В. З., Литовка Ю. В. Оптимальное управление технологическим процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. Т. 17, № 8. С. 547—553.
10. Бутягин П. И., Большанин А. В., Арбузова С. С. Влияние межэлектродного расстояния и соотношения площадей катода и анода на скорость формирования и состав МДО покрытий // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2021. Т. 29, № 1. С. 4—8.
11. Милованов И. В. Моделирование и оптимизация токовых режимов в процессах нанесения гальванопокрытий // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2002. Т. 8, № 4. С. 603—611.
12. Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 3. С. 185—191.
13. Соловьев Д. С., Мукина И. А., Литовка Ю. В. Особенности оптимального управления гальваническими процессами в многоанодной ванне с различными значениями силы тока // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 9. С. 631—636.
14. Дутов А. В., Литовка Ю. В., Нестеров В. А., Соловьев Д. С., Соловьева И. А., Сыпало К. И. Поиск оптимального управления токовыми режимами в гальванических процессах со многими анодами при разнообразии номенклатуры обрабатываемых изделий // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2019. № 1. С. 78—88.

Development and Research of the Optimal Control System of Electroplated Processes in Multi-Anode Baths

D. S. Solovjev, solovjevdenis@mail.ru, I. A. Solovjeva, good.win32@yandex.ru,
Tambov State University named after G. R. Derzhavin, Tambov, 392000, Russian Federation,

Corresponding author: Solovjev D. S., Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Tambov State University named after G. R. Derzhavin, Tambov, 392000, Russian Federation, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Accepted on May 11, 2022

Abstract

The relevance of increasing the distribution uniformity of the electroplated coating thickness on the surface of details is considered in the article. The analysis of control actions that affect the uniformity of the electroplated coating thickness was carried out, during which preference was given to the use of multi-anode baths. The existing modes of the electroplated process in multi-anode baths aren't widely used due to the constructive implementation complexity arising from the need to ensure the uniformity of the resulting coating thickness for multi-assortment industries. The authors propose an electroplated process mode, during which the optimal number and anodes size are found, as well as the current and duration of its flow through them, which ensure the alignment of the electric field lines distribution in the electrolyte between the anodes and the coated detail surface. The control system structure (mathematical model, search algorithm, control and actuator) with feedback on the current through the detail surface is designed to implement considered mode optimal control and an algorithm for its operation (based on the PID law and relay control) is proposed. The practical implementation was carried out using the industrial automation software package CoDeSys V2.3 in the programming language FBD. The proposed mode optimal control was found on the example of applying a zinc coating to a Z-shaped detail. As a result of simulation modeling, the control loop was tuned to the squared deviation integral minimum of the setpoint and the correctness of the control system operation algorithm was demonstrated by a relative average coating thickness deviation up to 5 %, which is comparable to the error of modern thickness gauges.

Keywords: simulation modeling, optimal control system, structural scheme, algorithm, electroplated process, multi-anode bath

For citation:

Solovjev D. S., Solovjeva I. A. Development and Research of the Optimal Control System of Electroplated Processes in Multi-Anode Baths, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23 no. 9, pp. 462–472.

DOI: 10.17587/mau.23.462-472

References

1. Vinokurov E. G., Burukhina T. F., Guseva T. V. Electroplating industry in Russia: assessment approach, improvement tasks of resource and environmental effectiveness, *Tekhnologiya metallov*, 2020, vol. 7, pp. 2–6 (in Russian).
2. Deulin B. I. Ion exchange installing for express analysis the concentration of ion in the electrolyte solution, *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 1, no. 104, pp. 31–33 (in Russian).
3. Aseeva A. V., Popov A. N. Ejector mixing of solutions in electroplating, *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*, 2004, vol. 12, no. 1, pp. 44–49 (in Russian).
4. Milovanov I. V., Vasilyev S. A. Choice and control of temperature modes in electroplating baths, *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 473–478 (in Russian).
5. Varentsov V. K., Yusin S. I., Varentsova V. I. Effect of current density and solution flow rate on the dynamics of copper precipitation on the electrodes made of carbon fibrous materials, *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya*, 2009, vol. 17, no. 4, pp. 349–358 (in Russian).
6. Bannikov A. A., Litovka Yu. V. Optimal placement of cathodes in an automated control system for a galvanic bath, *Vesti vysshih uchebnykh zavedenij Chernozem'ya*, 2021, vol. 3, no. 65, pp. 3–9 (in Russian).
7. D'yakov I. A. Control system of the rectifier of multianode galvanic baths, *Radiotekhnika*, 2010, vol. 12, pp. 52–54 (in Russian).
8. Pchelintseva I. Yu., Litovka Yu. V. Automated control system for the process of electroplating in a bath with a non-conductive of electric current screen, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 188–196 (in Russian).
9. Solovjev D. S., Cao V. Z., Litovka Yu. V. Optimal control for the electroplating process based on the supplementary cathode and bipolar electrode, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 8, pp. 547–553 (in Russian).
10. Butyagin P. I., Bolshanin A. V., Arbuzova S. S. Influence of the interelectrode distance and the ratio of the cathode and anode areas on the formation rate and properties of MAO coatings, *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 4–8 (in Russian).
11. Milovanov I. V. Modeling and optimization of current regimes in the process of electroplated coatings, *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 603–611 (in Russian).
12. Lutov A. G., Ishkulova A. R. Automated system the extreme multidimensional management of process plating, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 185–191 (in Russian).
13. Solovjev D. S., Mukina I. A., Litovka Yu. V. Specific features of the optimal control of the electroplating processes in a multianode bath with different amperage values, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 631–636 (in Russian).
14. Dutov A. V., Sypalo K. I., Solovjev D. S., Litovka Y. V., Solovjeva I. A., Nesterov V. A. Search for the optimal control over current regimes in electroplating processes with multi anodes at a diversified assortment of treated articles, *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2019, vol. 1, pp. 78–88 (in Russian).