

Д. С. Соловьев, канд. техн. наук, доц., solovjevdenis@mail.ru,
ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина", г. Тамбов

Разработка и анализ интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти в условиях предсказуемой неопределенности

Проведен анализ способов улучшения равномерности гальванических покрытий, среди которых наиболее перспективным для многономенклатурного серийного типа производства является управление токовым режимом. Для управления токовым режимом рассматривается гальванический процесс как объект управления и описывается его математическая модель (с распределенными координатами на базе законов Фарадея и Ома, а также дифференциального уравнения Лапласа в частных производных). Из-за сложности математической модели гальванического процесса поиск оптимального управления невозможен в режиме реального времени и требует длительных предварительных расчетов. Применение ассоциативной памяти в интеллектуальной системе позволит сформировать управление, которое соответствует текущему состоянию гальванического процесса и заданному критерию качества (равномерности покрытия) в реальном времени. Предложен алгоритм работы блока формирования знаний, подразумевающий применение интеллектуальной системы управления в условиях предсказуемой неопределенности с ассоциативной памятью матричного типа. Заполнение строк ассоциативной памяти осуществляется на основе аппроксимации критерия равномерности квадратичной функцией и выбора ее значений при заданных потерях в качестве. Рассмотрен алгоритм работы регулятора, который использует управление из строки ассоциативной памяти, имеющей взвешенную метрику, наиболее близкую к нормализованным значениям входных переменных. Предложен алгоритм работы блока оценки качества на основе определения влияния входных переменных на выходную переменную посредством расчета их весовых коэффициентов значимости, для определения значений которых используются максимальные значения, размах и максимальные локальные изменения для вероятности неотрицательности отклонения выходной переменной от ее заданного значения. Для анализа эффективности предложенных алгоритмов работы блоков интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти с точки зрения длительности поиска управления и потери в равномерности покрытия проведен вычислительный эксперимент.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, ассоциативная память, предсказуемая неопределенность, алгоритм, гальванический процесс, равномерность покрытия

Введение

Нанесение гальванического покрытия является заключительной операцией в большинстве производственных процессов, и от качества получаемого покрытия напрямую зависит качество детали [1]. Одним из ключевых показателей качества гальванического покрытия является его равномерность [2]. Если равномерность низкая, это может привести к увеличению расхода металла для покрытия или к браку детали, что потребует повторного нанесения покрытия и, в конечном итоге, повысит себестоимость гальванического процесса. Для улучшения равномерности гальванического покрытия применяются фигурные аноды [3, 4], конфигурация которых подбирается из расчета выравнивания межэлектродного

расстояния от участков анода до поверхности детали. Использование фиктивных катодов позволяет снизить концентрацию силовых линий на угловых участках поверхности детали, тем самым снизить "краевой эффект" [5, 6]. Для направления электрического поля в труднодоступные участки на поверхности детали применяются биполярные электроды [7]. Однако использование данных подходов требует изготовления специальной оснастки, которая является весьма дорогостоящей, поэтому такой вариант не подходит для многономенклатурного серийного производства. Более перспективным направлением для данного типа производства является оптимальное управление токовым режимом протекания гальванического процесса. Процесс нанесения гальванического покрытия описывается математи-

ческой моделью, которая использует законы Фарадея, Ома и дифференциальное уравнение в частных производных для описания распределения потенциала в объеме электролита [8–11]. Поиск оптимального управления с использованием данной математической модели невозможен в режиме реального времени, поскольку требует длительных предварительных расчетов [12, 13]. Это обстоятельство снижает эффективность использования оптимального управления токовым режимом. Выходом из сложившейся ситуации является разработка интеллектуальной системы управления на базе ассоциативной памяти [14]. Данная технология основана на механизмах ассоциативной записи и восстановления информации, что позволяет быстро получать доступ к данным при управлении сложными объектами, где требуется проводить большой объем вычислений, которые могут быть выполнены заранее и записаны в память [15, 16]. Подобная интеллектуальная система позволит сформировать управление, соответствующее текущему состоянию гальванического процесса и заданному критерию качества (равномерности покрытия) в реальном времени.

Целью работы является разработка и анализ интеллектуальной системы управления на базе ассоциативной памяти для гальванического процесса.

Анализ гальванического процесса как объекта управления

Гальванический процесс основан на электрохимическом взаимодействии между двумя металлическими поверхностями, одна из которых является катодом (деталь), а другая — анодом. Катод покрывается тонким слоем металла, который может быть использован для защиты от коррозии или для улучшения эстетических свойств готового изделия.

Для оптимального управления гальваническим процессом необходимо определить входные $\mathbf{X}$ и выходные $\mathbf{Y}$ переменные, а также управляющие $\mathbf{U}$ и возмущающие $\mathbf{F}$ воздействия.

Входными переменными $\mathbf{X}$ являются:

$$\mathbf{X} = \{T; S_c; t; pH\}, \quad (1)$$

где T — длительность процесса; S_c — площадь поверхности катода; t , pH — температура и кислотность электролита.

Рассмотрим входные переменные (1) более подробно:

1. Длительность процесса T является одним из факторов, определяющих толщину гальванического покрытия: чем дольше протекает процесс, тем толще будет слой металла на поверхности детали. Однако слишком длительное время нанесения может привести к появлению дефектов в покрытии, таких как трещины или неравномерность.

2. Площадь катода S_c также влияет на толщину гальванического покрытия, при этом важно учитывать, что при увеличении площади катода S_c необходимо увеличивать и площадь анода, чтобы сохранить баланс электрических зарядов.

3. Температура электролита t — это еще один фактор, который играет роль в формировании толщины гальванического покрытия. При повышении температуры t скорость реакции увеличивается, что приводит к более быстрому осаждению металла на поверхности катода S_c . Однако слишком высокая температура может привести к появлению дефектов в покрытии (пятна, отслаивание).

4. Кислотность электролита pH также оказывает влияние на толщину гальванического покрытия: значение кислотности pH меняет скорость реакции. Однако важно учитывать, что изменение кислотности может привести к изменению состава электролита и, как следствие, к изменению свойств покрытия.

Толщина покрытия δ на детали S_c играет ключевую роль в гальваническом процессе, определяющую качество и долговечность конечных изделий, и является выходной переменной $\mathbf{Y}$ объекта управления:

$$\mathbf{Y} = \{\delta(x, y, z)\}, \quad (2)$$

где (x, y, z) — декартовы координаты точки на поверхности катода.

Требуемое значение выходной переменной

$$\mathbf{Y}_{\text{set}} = \{\delta_{\text{set}}\} \quad (3)$$

обеспечивает необходимую выходную величину объекта управления, отклонение которой определяется как

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{Y} &= \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_{\text{set}} = \\ &= \min_{(x, y, z) \in S_c} \delta(x, y, z) - \delta_{\text{set}} = \delta_{\min} - \delta_{\text{set}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где set — заданное значение; $\min$ — минимальное значение.

Управляющим воздействием U для гальванического процесса является

$$U = \{I\}, \quad (5)$$

где I — сила тока.

Сила тока I является параметром, определяющим количество электрической энергии, передаваемой на поверхность детали S_c : чем больше сила тока I , тем большую толщину покрытия набирает деталь за единицу времени. Однако при слишком большой силе тока I возможен перегрев детали S_c , что влечет деформацию или разрушение покрытия. Вместе с тем, при слишком малой силе тока I скорость нанесения покрытия будет низкой, что при фиксированной длительности процесса может привести к недостаточной толщине покрытия. Также при слишком малой силе тока I возможно образование газовых пузырьков на поверхности детали S_c , что увеличит неравномерность наносимого покрытия. Поэтому определение оптимальной силы тока I является важным этапом при гальваническом осаждении покрытия, так как позволяет достичь заданной толщины покрытия и обеспечить его равномерность.

Для оценки качества управления U используется следующий критерий равномерности распределения толщины покрытия на детали:

$$R = \frac{1}{S_c} \int \frac{\delta_{\min}}{\delta(x, y, z)} dS_c \rightarrow \max, \quad (6)$$

где $\max$ — максимальное значение.

В процессе нанесения гальванического покрытия возможны возмущения F , которые могут влиять на выходную переменную:

$$F = \{A; H\}, \quad (7)$$

где A — примеси в электролите; H — шероховатость поверхности катода.

Наличие примесей A в электролите и шероховатости H поверхности катода может привести к неоднородности покрытия, снижающей его качество. Например, содержание в электролите ионов сторонних металлов приводит к образованию нежелательных соединений на поверхности катода, что, в свою очередь, снизит адгезию покрытия к катоду и уменьшит его защитные свойства. Недостаточно гладкая поверхность катода ведет к образованию неровностей на его поверхности, это влечет за собой снижение защитных свойств и уменьшение долговечности покрытия.

Для минимизации влияния возмущений (7) необходимо обеспечить чистоту электролита и гладкость поверхности катода.

Для связи входных переменных X и управляющего воздействия U с выходной переменной Y рассмотрим математическую модель гальванического процесса.

Математическая модель гальванического процесса

Перед рассмотрением математической модели гальванического процесса примем следующие допущения:

1. Для того чтобы изменить длительность T гальванического процесса, необходимо внести изменения в настройки выпрямительного агрегата. Однако следует иметь в виду, что это возможно только до начала процесса. После того, как процесс уже начался, изменить настройки невозможно без остановки и последующего перезапуска самого процесса, а это, как правило, в итоге приводит к браку (отслаиванию покрытия). В связи с вышесказанными, длительность T гальванического процесса принимается постоянной.

2. Ток проходит через поверхность детали, вызывая химические реакции на ее поверхности, но не влияет на ее объем, поэтому площадь S_c поверхности детали остается неизменной в ходе нанесения гальванического покрытия.

3. Изменение температуры t и кислотности pH во время гальванического процесса сдвигает химическое равновесие протекающей реакции, что влияет на качество получаемого покрытия. Поэтому осуществляется регулирование значений данных переменных в узком диапазоне, это позволяет принять их значения постоянными в расчетах.

С учетом принятых допущений математическая модель гальванического процесса примет следующий вид.

Толщина покрытия рассчитывается по закону Фарадея:

$$\delta(x, y, z) = \frac{k}{\rho} \eta(j_c(x, y, z), t, pH) j_c(x, y, z) T, \quad (8)$$

где j_c — плотность тока на катод; η — выход по току; k , ρ — электрохимический эквивалент и плотность металла покрытия.

Сила тока и плотности тока определяются согласно закону Ома:

$$I = \int_{S_c} j_c(x, y, z) dS_c; \quad (9)$$

$$j_c(x, y, z) = -\chi \nabla \varphi(x, y, z) | S_c; \quad (10)$$

$$j_a(x, y, z) = \chi \nabla \varphi(x, y, z) | S_a, \quad (11)$$

где j_a — плотность тока на аноде; χ — удельная электропроводность электролита; ∇ — оператор Гамильтона; φ — потенциал электрического поля.

Потенциал электрического поля описывается дифференциальным уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z)}{\partial z^2} \Big|_{V_{el}} = 0 \quad (12)$$

с условием на границе "электролит—изолятор"

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial n} \Big|_{S_{ins}} = 0, \quad (13)$$

с условием на границе "электролит—анод"

$$\varphi(x, y, z) + \Psi_a(j_a(x, y, z)) | S_a = \Delta \varphi, \quad (14)$$

с условием на границе "электролит—катод"

$$\varphi(x, y, z) - \Psi_c(j_c(x, y, z)) | S_c = 0, \quad (15)$$

где V_{el} — объем электролита; S_{ins} — площадь поверхности изолятора; n — нормаль к поверхности; $\Delta \varphi$ — напряжение; Ψ_a , Ψ_c — анодная и катодная поляризация.

Для расчета уравнений (8)–(15) математической модели процесса необходимо использовать численные методы (например, метод конечных разностей, метод конечных элементов), которые позволяют решать дифференциальные уравнения в частных производных [17]. Эти методы требуют большого количества вычислительных ресурсов и времени, что делает процесс расчета оптимального управления U длительным.

В связи с вышесказанным рассмотрим интеллектуальную систему управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти.

Интеллектуальная система управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти

Ассоциативная память в интеллектуальных системах управления является основой для хранения и обработки больших объемов данных, это позволяет системе быстро реагировать на изменения входных переменных и находить соответствующие управляющие воздействия.

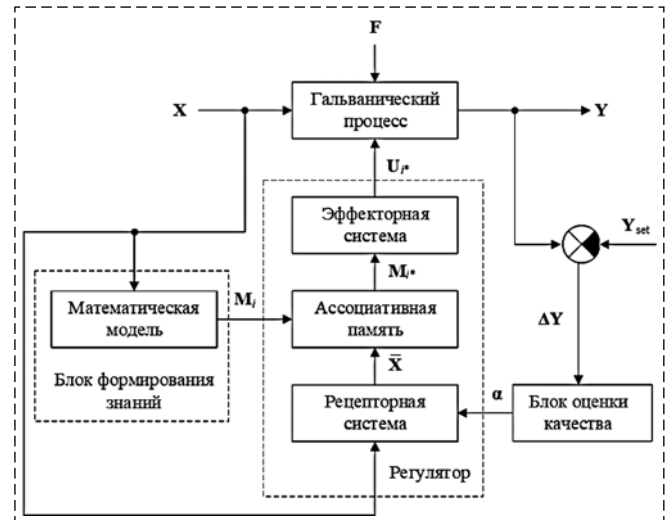


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти
Fig. 1. Structural diagram of an intelligent electroplating control system based on associative memory

Интеллектуальная система управления гальваническим процессом состоит из блока формирования знаний, регулятора и блока оценки качества, ее структурная схема приводится на рис. 1.

В блоке формирования знаний с помощью уравнений (8)–(15) математической модели гальванического процесса в зависимости от значений входных переменных (1) происходит обучение ассоциативной памяти на значения управляющего воздействия (5) и критерия равномерности покрытия (6).

В составе регулятора присутствует рецепторная система, ассоциативная память и эффекторная система. Рецепторная система осуществляет нормализацию входных переменных. С помощью ассоциативной памяти проводится классификация множества входных переменных (1) по полученным значениям его компонент. Эффекторная система на основе информации из ассоциативной памяти формирует управляющее воздействие. Регулятор на основе информации о входных переменных (1) восстанавливает управляющее воздействие (5) без решения уравнений (8)–(15) математической модели.

На основе отклонения (4) блоком оценки качества осуществляется определение влияния входных переменных (1) на выходную переменную (2) объекта управления.

Рассмотрим более детально алгоритмы работы блока формирования знаний в ассоциативной памяти, регулятора и блока оценки качества.

Алгоритм работы блока формирования знаний

При использовании ассоциативной памяти возникает проблема определения ее размеров, которые не должны приводить к нарушению устойчивости и ухудшению качества управления. Обучать ассоциативную память предлагается на информации о значениях входных переменных объекта и управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый критерий качества. Алгоритм работы блока формирования знаний подразумевает работу системы управления в условиях предсказуемой неопределенности с ассоциативной памятью матричного типа.

1. Задаются диапазоны изменения входных переменных:

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max}; \quad (16)$$

$$S_{c_{\min}} \leq S_c \leq S_{c_{\max}}; \quad (17)$$

$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max}; \quad (18)$$

$$pH_{\min} \leq pH \leq pH_{\max}. \quad (19)$$

2. С использованием уравнений (8)–(15) математической модели заполняется ассоциативная память матричного типа строками, число которых составляет $(l + 1)^4$, вида

$$\mathbf{M}_i = \{\mathbf{X}_i; \mathbf{U}_i; R_i\} = \{\{T_i; S_{c_i}; t_i; pH_i\}; I_i; R_i\}, \quad (20)$$

$$(i = 0, 1, \dots, (l + 1)^4 - 1),$$

где i — индекс строки; l — число отрезков разбиения диапазона изменения координаты из множества входных переменных.

3. Значения критерия (6) в полученных строках (20) ассоциативной памяти аппроксимируются многомерной функцией R_{apr} вида

$$R_{apr} = a_0 + a_1 T + a_2 S_c + a_3 t + a_4 \cdot pH +$$

$$+ a_5 T S_c + a_6 T t + a_7 T \cdot pH + a_8 S_c t + a_9 S_c \cdot pH +$$

$$+ a_{10} t \cdot pH + a_{11} T^2 + a_{12} S_c^2 + a_{13} t^2 + a_{14} \cdot pH^2, \quad (21)$$

где $a_0, \dots, a_{14}$ — неизвестные коэффициенты.

4. Осуществляется построение N изолиний (линий, соединяющих точки на поверхности, в которых функция (21) принимает одно и то же значение):

$$R_{apr_i} = R_{apr_{\min}} + i \frac{\delta R_{\text{set}}}{100} (R_{apr_{\max}} - R_{apr_{\min}}), \quad (22)$$

$$(i = 0, 1, \dots, N),$$

$$N = \left\lceil \frac{100}{\delta R_{\text{set}}} \right\rceil, \quad (23)$$

где [...] — целая часть числа; $R_{apr_{\min}}, R_{apr_{\max}}$ — минимальное и максимальное значения критерия равномерности; N — число значений линейного уровня, обеспечивающих условие, согласно которому для любых двух соседних строк $\mathbf{M}_i$ и $\mathbf{M}_{i+1}$ должны выполняться заданные потери в критерии равномерности покрытия:

$$\frac{|R_i - R_{i+1}|}{R_i} \cdot 100 \% \leq \delta R_{\text{set}}, \quad (24)$$

где δR_{set} — потери в равномерности покрытия.

5. Матрица управления очищается и заполняется новыми N значениями $\mathbf{X}_i$ для найденных изолиний (22) с последующим расчетом $\mathbf{U}_i$ и R_i согласно уравнениям (8)–(15) математической модели.

Алгоритм работы регулятора

Из ассоциативной памяти по первой части строки (значениям входных переменных) восстанавливается вторая часть строки (значения управляющих воздействий), что позволяет оперативно идентифицировать состояние системы и выбрать управляющее воздействие. Таким образом, алгоритм работы регулятора подразумевает использование управления из строки ассоциативной памяти, имеющей взвешенную метрику, наиболее близкую к нормализованным значениям входных переменных.

1. Рецепторной системой осуществляется нормализация входных переменных:

$$\bar{\mathbf{X}} = \{\bar{T}, \bar{S}_c, \bar{t}, \overline{pH}\}, \quad (25)$$

где $\bar{T}, \bar{S}_c, \bar{t}, \overline{pH}$ вычисляются согласно выражениям

$$\bar{T} = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}; \quad (26)$$

$$\bar{S}_c = \frac{S_c - S_{c_{\min}}}{S_{c_{\max}} - S_{c_{\min}}}; \quad (27)$$

$$\bar{t} = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}; \quad (28)$$

$$\overline{pH} = \frac{pH - pH_{\min}}{pH_{\max} - pH_{\min}}. \quad (29)$$

2. Среди всех N строк ассоциативной памяти (20) выбирается такая строка, у которой минимальна мера удаленности для нормализованных величин входных переменных (25), вычисленная как взвешенное расстояние Евклида:

$$i^* = \arg \min_{0 \leq i \leq N} D(\bar{\mathbf{X}}_i, \bar{\mathbf{X}}) = \arg \min_{0 \leq i \leq N} \sqrt{\alpha_T (\bar{T}_i - \bar{T})^2 + \alpha_{S_c} (\bar{S}_{c_i} - \bar{S}_c)^2 + \alpha_t (\bar{t}_i - \bar{t})^2 + \alpha_{pH} (\bar{pH}_i - \bar{pH})^2}, \quad (30)$$

где $\alpha_T, \alpha_{S_c}, \alpha_t, \alpha_{pH}$ — весовые коэффициенты значимости входных переменных.

3. Эффекторной системой из найденной строки (30) ассоциативной памяти извлекается управляющее воздействие

$$\mathbf{U}_{i^*} = \{I_{i^*}^*\}, \quad (31)$$

которое является уставкой силы тока в настройках выпрямительного агрегата.

Алгоритм работы блока оценки качества

Алгоритм работы блока оценки качества подразумевает определение влияния входных переменных на выходную величину посредством расчета весовых коэффициентов значимости в выражении (30), для определения значений которых используются максимальные значения, размах и максимальные локальные изменения для вероятности неотрицательности отклонения (4).

1. Фиксируется значение $T \in \{T_0 = T_{\min}, T_1, \dots, T_{l-1}, T_l = T_{\max}\}$ из диапазона (16), а остальные значения S_c, t и pH изменяются в допустимых диапазонах (17)–(19), для них вычисляется значение вероятности неотрицательности отклонения (4) выходной переменной:

$$P_{\Delta Y \geq 0}^T(T) = \frac{Q_{\Delta Y \geq 0}^T(T)}{Q^T}, \quad (32)$$

где $Q_{\Delta Y \geq 0}^T$ — число вариантов, при которых выполняется неотрицательность отклонения (4); Q^T — общее число вариантов.

Аналогичные зависимости $P_{\Delta Y \geq 0}^{S_c}, P_{\Delta Y \geq 0}^t$ и $P_{\Delta Y \geq 0}^{pH}$ строятся, соответственно, для остальных переменных S_c, t и pH .

2. Для рассчитанных вероятностей отыскивается максимальное значение m_T , размах r_T и максимальное локальное изменение d_T (приведено для переменной T):

$$m_T = \max_{T \in \{T_0, T_1, \dots, T_{l-1}, T_l\}} P_{\Delta Y \geq 0}^T(T); \quad (33)$$

$$r_T = \max_{T \in \{T_0, T_1, \dots, T_{l-1}, T_l\}} P_{\Delta Y \geq 0}^T(T) - \min_{T \in \{T_0, T_1, \dots, T_{l-1}, T_l\}} P_{\Delta Y \geq 0}^T(T); \quad (34)$$

$$d_T = \max_{1 \leq g \leq l} \left| \frac{P_{\Delta Y \geq 0}^T(T_g) - P_{\Delta Y \geq 0}^T(T_{g-1})}{T_g - T_{g-1}} (T_l - T_0) \right|. \quad (35)$$

Аналогичные расчеты $m_{S_c}, r_{S_c}, d_{S_c}, m_t, r_t, d_t, m_{pH}, r_{pH}, d_{pH}$ проводятся, соответственно, для остальных зависимостей $P_{\Delta Y \geq 0}^{S_c}, P_{\Delta Y \geq 0}^t$ и $P_{\Delta Y \geq 0}^{pH}$.

3. Расчет весовых коэффициентов значимости входных переменных (1) осуществляется следующим образом:

$$\alpha_T = \frac{1}{3} \left(\frac{m_T}{m_T + m_{S_c} + m_t + m_{pH}} + \frac{r_T}{r_T + r_{S_c} + r_t + r_{pH}} + \frac{d_T}{d_T + d_{S_c} + d_t + d_{pH}} \right); \quad (36)$$

$$\alpha_{S_c} = \frac{1}{3} \left(\frac{m_{S_c}}{m_T + m_{S_c} + m_t + m_{pH}} + \frac{r_{S_c}}{r_T + r_{S_c} + r_t + r_{pH}} + \frac{d_{S_c}}{d_T + d_{S_c} + d_t + d_{pH}} \right); \quad (37)$$

$$\alpha_t = \frac{1}{3} \left(\frac{m_t}{m_T + m_{S_c} + m_t + m_{pH}} + \frac{r_t}{r_T + r_{S_c} + r_t + r_{pH}} + \frac{d_t}{d_T + d_{S_c} + d_t + d_{pH}} \right); \quad (38)$$

$$\alpha_{pH} = \frac{1}{3} \left(\frac{m_{pH}}{m_T + m_{S_c} + m_t + m_{pH}} + \frac{r_{pH}}{r_T + r_{S_c} + r_t + r_{pH}} + \frac{d_{pH}}{d_T + d_{S_c} + d_t + d_{pH}} \right), \quad (39)$$

при этом выполняются условия

$$\alpha_T + \alpha_{S_c} + \alpha_t + \alpha_{pH} = 1, \quad (40)$$

$$\alpha_T, \alpha_{S_c}, \alpha_t, \alpha_{pH} \geq 0, \quad (41)$$

где наиболее значимая переменная имеет самый большой весовой коэффициент.

Для анализа эффективности предложенных алгоритмов работы блоков интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти с точки зрения длительности поиска управления и потери в равномерности покрытия проведен вычислительный эксперимент.

Вычислительный эксперимент и анализ полученных результатов

Формирование знаний в ассоциативной памяти осуществлялось для гальванического

процесса никелирования в сульфатном электролите Уоттса. Значения параметров и функций, используемых в уравнениях математической модели гальванического процесса, представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Для решения уравнений математической модели гальванического процесса использовался Electrodeposition Module фирмы COMSOL Multiphysics [18].

Применялись значения диапазонов изменения входных переменных, которые представлены в табл. 3, при заданных потерях критерия равномерности $\delta R_{\text{set}} = 10 \%$.

Поиск неизвестных коэффициентов $a_0, \dots, a_{14}$ осуществлялся с использованием разработанного программного обеспечения на языке Python посредством функции `curve_fit` библиотеки `scipy` [19].

Найденная аппроксимация (21) критерия (6) в полученных строках (20) ассоциативной памяти для квадратичной функции со значениями неизвестных коэффициентов $a_0, \dots, a_{14}$ имеет вид

$$\begin{aligned} R_{apr} = & 0,602 - 0,0002T + 0,003S_c - \\ & - 0,0008t - 0,02 \cdot pH - 2,2 \cdot 10^{-7}TS_c + \\ & + 8 \cdot 10^{-7}Tt + 5,2 \cdot 10^{-6}T \cdot pH - \\ & - 6,5 \cdot 10^{-6}S_c t + 4,7 \cdot 10^{-5}S_c \cdot pH + \\ & + 1,1 \cdot 10^{-5}t \cdot pH + 2,4 \cdot 10^{-8}T^2 - \\ & - 5,7 \cdot 10^{-6}S_c^2 - 2,8 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0006 \cdot pH^2 \end{aligned}$$

при относительной погрешности в 7,2 %.

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) демонстрируется сформированная ассоциативная память матричного типа, визуализированная с помощью параллельных координат. Число строк в матрице составляет $N = 4181$.

Поиск управления выполнялся для значений входных переменных $\mathbf{X} = \{T; S_c; t; pH\} = \{2100; 100; 32; 4\}$, которым соответствует схема расположения деталей в гальванической ванне, представленная на рис. 3.

Поиск ближайшей к $\mathbf{X}$ строки в ассоциативной памяти осуществлялся без использования (при одинаковых значениях весовых коэффициентов $\alpha_T = \alpha_{S_c} = \alpha_t = \alpha_{pH} = 0,25$) и с использованием (для рассчитанных значений весовых коэффициентов) блока оценки качества для требуемого значения выходной переменной $Y_{\text{set}} = 8 \text{ мкм}$.

Таблица 1
Table 1

Значения параметров
The parameter values

Параметр	Единица измерения	Значение
k	г/(А·с)	0,0003042
ρ	г/дм ³	8900
χ	1/(Ом·дм)	6
S_{ins}	дм ²	1000
V_{el}	дм ³	2000
S_a	дм ²	300

Таблица 2
Table 2

Виды функций
The function types

Функция	Единица измерения	Выражение
η	—	$0,0706 + 0,137j_c + 0,0422pH + 0,007t$
Ψ_a	В	$0,00935j_a$
Ψ_c	В	$-(0,188 + 0,3\ln(0,0043j_c))$

Таблица 3
Table 3

Значения диапазона значений входных переменных
The range values of input variables

Переменная	Единица измерения	Значение
$T_{\min}$	с	1800
$T_{\max}$	с	3300
$S_{c\min}$	дм ²	50
$S_{c\max}$	дм ²	150
$t_{\min}$	°С	25
$t_{\max}$	°С	35
$pH_{\min}$	—	1,9
$pH_{\max}$	—	5,3

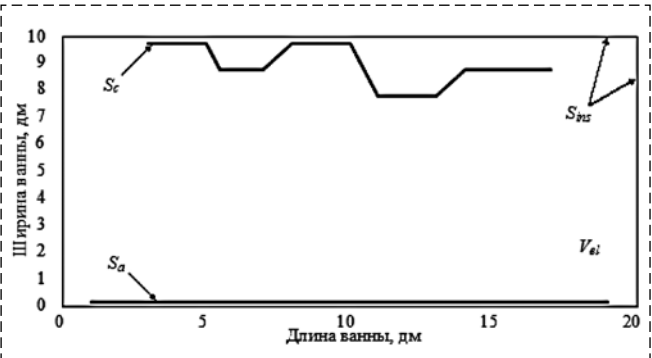


Рис. 3. Схема расположения деталей в гальванической ванне
Fig. 3. The details arrangement in an electroplating bath

Результаты расчета весовых коэффициентов
входных переменных

Calculating results of the weight coefficients of the input variables

Переменная	m	r	d	α
T	1,0	0,25	0,44	0,50
S_c	1,0	0,44	0,0	0,29
t	0,93	0,03	0,05	0,13
pH	0,94	0,0	0,0	0,08

При $l = 5$ в выражении (20) для рассчитанных вероятностей $P_{\Delta Y}^T > 0$, $P_{\Delta Y}^{S_c} > 0$, $P_{\Delta Y}^t > 0$ и $P_{\Delta Y}^{pH} > 0$ определены максимальное значение, размах и максимальное локальное изменение, а также значения весовых коэффициентов α_T , α_{S_c} , α_r , α_{pH} . Результаты расчета приведены в табл. 4.

В результате расчета уравнений математической модели гальванического процесса для X был получен критерий равномерности $R = 0,50123$ при оптимальной силе тока $I^* = 270$ А, длительность поиска которой составила 1860 с. В результате управления с использованием ассоциативной памяти была найдена строка $i^* = 1097$ в матрице, которой соответствует $M_{i^*} = \{1965,0; 105,0; 34,9; 4,42; 300; 0,46680\}$, и строка $i^* = 1613$ в матрице, которой соответствует $M_{i^*} = \{2070,0; 105,0; 34,9; 4,61; 275; 0,49672\}$, при равнозначности и при рассчитанных значениях весовых коэффициентов. Длительности поиска управлений составили 0,02251 с и 0,02319 с соответственно. На рис. 4 (см. третью сторону обложки) показаны распределения толщины покрытия по длине катода в сечении, полученные в результате: 1 — расчета уравнений математической модели гальванического процесса; 2, 3 — поиска управления в ассоциативной памяти при равнозначности и при рассчитанных значениях весовых коэффициентов соответственно.

Найденные в ассоциативной памяти управления $I^* = 300$ А и $I^* = 275$ А обеспечивают реальные значения критериев равномерности $R = 0,42475$ и $R = 0,48221$, что составляет $\delta R_{\text{set}} = 15,28\%$ и $\delta R_{\text{set}} = 3,79\%$ при снижении длительности поиска до $0,121 \cdot 10^{-2}\%$ и $0,125 \cdot 10^{-2}\%$ от времени расчета силы тока по уравнениям математической модели гальванического процесса соответственно. При этом управление, найденное в ассоциативной памяти при равнозначности весовых коэффициентов для вход-

ных переменных, превышает заданные потери в равномерности получаемого покрытия.

Заключение

Интеллектуальные системы управления технологическими процессами на базе ассоциативной памяти являются результативным инструментом в современной промышленности, способным обеспечить эффективное использование ресурсов и повышение производительности производства. К преимуществам такой системы управления относится возможность автоматической адаптации к изменяющимся условиям многономенклатурного серийного типа производства, к которому относится гальваника. Предложенная интеллектуальная система управления на базе ассоциативной памяти позволяет увеличить скорость поиска силы тока для обеспечения равномерности покрытия, получаемого в результате гальванического процесса. Следует отметить, что скорость поиска управления можно дополнительно увеличить, если в регуляторе осуществить предварительную кластеризацию строк ассоциативной памяти и отыскивать решение задачи только среди значений кластера с ближайшим от центра взвешенным евклидовым расстоянием для входных переменных. Разработанная интеллектуальная система на базе ассоциативной памяти представляет концептуальный интерес для управления не только гальваническими процессами, но и другими технологическими процессами, в которых требуется обрабатывать входные данные с помощью математических моделей с распределенными координатами для поиска управления в реальном времени.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г. Р. Державина.

Список литературы

1. Гамбург Ю. Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению. М.: Техвосфера, 2006. 216 с.
2. Помогаев М. В., Помогаев В. М., Волкович А. В. Равномерность гальванических покрытий и методы ее повышения // Практика противокоррозионной защиты. 2003. № 2 (28). С. 49—52.

3. Ishizuka N., Yamada T., Izui K., Nishiwaki S. Topology optimization for unifying de-posit thickness in electroplating process // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020. Vol. 62. P. 1767–1785.
4. Yang G., Deng D., Zhang Y., Zhu Q., Cai J. Numerical optimization of electrodeposition thickness uniformity with respect to the layout of anode and cathode // *Electrocatalysis*. 2021. Vol. 12. P. 478–488.
5. Park C.-W., Park K.-Y. An effect of dummy cathode on thickness uniformity in electro-forming process // *Results in Physics*. 2014. Vol. 4. P. 107–112.
6. Solovjev D. S., Solovjeva I. A., Konkina V. V. Software Development for the Optimal Parts Location in the Bath Space with the Purpose to Reduce the Non-uniformity of the Coating Thickness // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 85–93.
7. Anand R. K. Bipolar electrode focusing: tuning the electric field gradient // *Lab on a Chip*. 2011. Vol. 11. P. 518–527.
8. Popov K. I., Živković P. M., Nikolić N. D. A mathematical model of the current density distribution in electrochemical cells // *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2011. Vol. 76. P. 805–822.
9. Wang F. Y., Xu J. W., Zhao J. S. Numerical Simulation of Electrochemical Machining Process and Machined Surface Prediction // *Key Engineering Materials*. 2011. Vol. 458. P. 99–105.
10. Пчелинцева И. Ю., Литовка Ю. В. Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токонепроводящим экраном // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022. Т. 23, № 4. С. 188–196.
11. Соловьев Д. С., Соловьева И. А. Разработка и исследование системы оптимального управления гальванически-

ми процессами в ваннах со многими анодами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022. Т. 23, № 9. С. 462–472.

12. Solovjev D. S., Solovjeva I. A., Litovka Y. V., Nesterov V. A. Searching Method for Suboptimal Action Ensuring Acceptable Losses in the Process Quality // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. Vol. 49. P. 429–438.

13. Solovjev D. S., Solovjeva I. A., Litovka Y. V. Synthesis of the suboptimal control algorithm for electroplating processes under conditions of uncertainty in the range of processed products // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709(022063). P. 1–7.

14. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.

15. Карабутов Н. Н., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Модели адаптивного управления на базе ассоциативной памяти // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 12. С. 11–17.

16. Романов М. П. Высокоточная система управления для сборочных роботов на основе ассоциативной памяти // *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015. № 3-1 (8). С. 60–87.

17. Ильин В. П. Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2000. 345 с.

18. Giaccherini A., Caporali S., Berretti E., Marcantelli P., Sanzari I., Perissi I., Innocenti M. Finite Elements Analysis of an Electrochemical Coating Process of an Irregularly Shaped Cathode with COMSOL Multiphysics® // *ECS Transactions*. 2015. Vol. 64. P. 1–8.

19. Johansson R. Numerical Python: Scientific Computing and Data Science Applications with Numpy, SciPy and Matplotlib. New York: Apress, 2018. 700 p.

Development and Analysis of an Intelligent Electroplating Control System Based on Associative Memory under Conditions of Predictable Uncertainty

D. S. Solovjev, solovjevdenis@mail.ru,

Derzhavin Tambov State University, Tambov, 392036, Russian Federation,

Corresponding author: Solovjev D. S., Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Derzhavin Tambov State University, Tambov, 392036, Russian Federation, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Accepted on May 22, 2023

The analysis of ways to improve the electroplated coating uniformity, among which the most promising for a multi-assortment production is the current control, is presented in the article. The electroplating is considered as a control object and its mathematical model is described (with distributed coordinates based on the laws of Faraday and Ohm, Laplace's partial differential equation) to current control. The search for optimal control is impossible in real time and requires lengthy preliminary calculations due to the complexity of the electroplating mathematical model. The use of associative memory in an intelligent system will make it possible to find a control that corresponds to the electroplating current state and the specified quality criterion (coating uniformity) in real time. An operation algorithm of the knowledge formation unit, which implies the use of an intelligent control system under predictable uncertainty with matrix-type associative memory, is proposed. The associative memory rows are filled based on the uniformity criterion approximation by the function and the choice of its values for given quality losses. An operation algorithm of the controller, which uses the control from the associative memory row with the closest weighted metric to the normalized values of the input variables, is considered. An operation algorithm of the quality assessment unit, which involves determining the influence of input variables on the output variable by calculating their weighting coefficients of significance, to determine the values of which the maximum values, range and maximum local changes are used for the probability of non-negativity of the output variable deviation from its given value, is proposed. A computational experiment was carried out to analyze the effectiveness of the proposed operation algorithms for the units of an intelligent electroplating control system based on associative memory in terms of the control search duration and loss in coating uniformity.

Keywords: intelligent control system, associative memory, predictable uncertainty, algorithm, electroplating, coating uniformity

For citation:

Solovjev D. S. Development and Analysis of an Intelligent Electroplating Control System Based on Associative Memory under Conditions of Predictable Uncertainty, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 11, pp. 573–582.

DOI: 10.17587/mau.24.573-582

References

1. **Gamburg Y. D.** Electroplated coatings. Application guide, Moscow, Tekhvosfera, 2006, 216 p. (in Russian).
2. **Pomogaev M. V., Pomogaev V. M., Volkovich A. V.** Uniformity of electrodeposited coatings and methods of its increase, *Praktika protivokorroziionnoj zashchity*, 2003, vol. 2, no. 28, pp. 49–52 (in Russian).
3. **Ishizuka N., Yamada T., Izui K., Nishiwaki S.** Topology optimization for unifying de-posit thickness in electroplating process, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, vol. 62, pp. 1767–1785.
4. **Yang G., Deng D., Zhang Y., Zhu Q., Cai J.** Numerical optimization of electrodeposition thickness uniformity with respect to the layout of anode and cathode, *Electrocatalysis*, 2021, vol. 12, pp. 478–488.
5. **Park C.-W., Park K.-Y.** An effect of dummy cathode on thickness uniformity in electro-forming process, *Results in Physics*, 2014, vol. 4, pp. 107–112.
6. **Solovjev D. S., Solovjeva I. A., Konkina V. V.** Software Development for the Optimal Parts Location in the Bath Space with the Purpose to Reduce the Non-uniformity of the Coating Thickness, *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 85–93.
7. **Anand R. K.** Bipolar electrode focusing: tuning the electric field gradient, *Lab on a Chip*, 2011, vol. 11, pp. 518–527.
8. **Popov K. I., Živković P. M., Nikolić N. D.** A mathematical model of the current density distribution in electrochemical cells, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2011, vol. 76, pp. 805–822.
9. **Wang F. Y., Xu J. W., Zhao J. S.** Numerical Simulation of Electrochemical Machining Process and Machined Surface Prediction, *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 458, pp. 99–105.
10. **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).
11. **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 (in Russian).
12. **Solovjev D. S., Solovjeva I. A., Litovka Y. V., Nesterov V. A.** Searching Method for Suboptimal Action Ensuring Acceptable Losses in the Process Quality, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, vol. 49, pp. 429–438.
13. **Solovjev D. S., Solovjeva I. A., Litovka Y. V.** Synthesis of the suboptimal control algorithm for electroplating processes under conditions of uncertainty in the range of processed products, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 022063, pp. 1–7.
14. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P.** Artificial intelligence and intelligent control systems, Moscow, Nauka, 2006, 333 p. (in Russian).
15. **Karabutov N. N., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P.** Models of adaptive control on the base of associative memory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 12, pp. 11–17 (in Russian).
16. **Romanov M. P.** High-precision control system of assembly robots based on associative memory, *Vestnik MGTU MIREA*, 2015, no. 3-1 (8), pp. 60–87 (in Russian).
17. **Il'in V. P.** Finite difference and finite volume methods for elliptic equations, Novosibirsk, Izdatel'stvo Instituta matematiki, 2000, 345 p. (in Russian).
18. **Giaccherini A., Caporali S., Berretti E., Marcantelli P., Sanzari I., Perissi I., Innocenti M.** Finite Elements Analysis of an Electrochemical Coating Process of an Irregularly Shaped Cathode with COMSOL Multiphysics®, *ECS Transactions*, 2015, vol. 64, pp. 1–8.
19. **Johansson R.** Numerical Python: Scientific Computing and Data Science Applications with Numpy, SciPy and Matplotlib, New York, Apress, 2018, 700 p.



МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫЙ СОВЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ

Российская академия наук, Уральская школа науки и технологий им. академика В. П. Макеева
и Межрегиональный совет по науке и технологиям
проводят 12–14 декабря 2023 г. в г. Миассе

LIII Всероссийский симпозиум ПО МЕХАНИКЕ И ПРОЦЕССАМ УПРАВЛЕНИЯ

Основные направления симпозиума:

- Механика неоднородных конструкций (методы расчета, проектирования и испытаний).
- Механика жидкости, газа и плазмы.
- Механика деформируемого твердого тела.
- Общая и прикладная механика.
- Процессы управления.
- Специальное машиностроение (проектирование, производство и испытания конструкций, и систем управления вооружений и военной техники).

Заявки на участие в работе симпозиума и рукописи докладов
необходимо представить до 15 ноября 2023 г. в МСНТ по адресу:
456304, г. Миасс Челябинской обл., ул. 8 Июля, 10А, офис 404.

Дополнительная информация доступна на сайте: www.msnt.pp.ru

Справки по тел.: (904) 940-28-71