## \_\_\_\_\_ ОПТИМАЛЬНОЕ \_\_\_\_\_ УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.357

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОКОВЫМИ РЕЖИМАМИ В ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ СО МНОГИМИ АНОДАМИ ПРИ РАЗНООБРАЗИИ НОМЕНКЛАТУРЫ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2019 г. А. В. Дутов<sup>*a*</sup>, Ю. В. Литовка<sup>*b*</sup>, В. А. Нестеров<sup>*c*</sup>, Д. С. Соловьев<sup>*d,b*</sup>, И. А. Соловьева<sup>*b*</sup>, К. И. Сыпало<sup>*a*,\*</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский центр "Институт им. Н.Е. Жуковского", Москва, Россия

<sup>b</sup>Тамбовский государственный технический ун-т, Тамбов, Россия <sup>c</sup>МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия <sup>d</sup>Тамбовский государственный ун-т им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия \*e-mail: ksypalo@tsagi.ru Поступила в редакцию 17.01.2018 г. После доработки 24.09.2018 г.

Проанализированы способы управления гальваническими процессами, выявлены недостатки в использовании для этой цели основных технологических и конструктивных конфигураций. Предложен авторский подход, заключающийся в управлении токовыми режимами в многоанодной ванне. При реализации этого подхода поставлена задача оптимального управления гальваническими процессами в соответствии с критерием неравномерности покрытия и длительности процесса. Гальванический процесс в ванне со многими анодами рассмотрен в качестве объекта управления, для которого определены векторы входа и выхода процесса, внешние возмущения и вектор управления. Для связи вектора управления с критерием оптимальности составлена математическая модель с распределенными координатами на основе дифференциального уравнения в частных производных эллиптического типа, отличающаяся учетом соответствующей величины силы тока на каждой анодной секции. Проведена серия экспериментов с изделием сложной формы, в которой доказана адекватность математической модели, эффективность предлагаемого подхода, и продемонстрирована овражность функции целевого критерия. Для реализации оптимального управления выбрана трехуровневая архитектура системы управления. Ввиду чрезвычайной длительности решения поставленной задачи предложена процедура предварительного поиска оптимальных управлений с формированием соответствующей матрицы. Рассмотрены действия при существовании или отсутствии найденного решения в матрице управления для поступающей партии изделий.

DOI: 10.1134/S0002338819010062

Введение. Интерес различных отраслей промышленности к использованию гальванических покрытий обуславливается современными требованиями к улучшению качества поверхностных слоев металлических изделий. Традиционно задачи управления гальваническими линиями классифицируют на управление автооператорами [1], перемещающими изделия по стадиям обработки, и управление протекающими в ваннах процессами. Для управления процессами в технологической документации указываются требования к наименьшей толщине слоя гальванического покрытия. Улучшение тактико-технических показателей гальванического процесса достигается уменьшением неравномерности слоя (разницы между наибольшей и наименьшей толшиной покрытия). На качество гальванических покрытий оказывают влияние технологические и конструктивные управляющие воздействия. Изучению проблемы снижения неравномерности гальванического покрытия посвящено значительное количество исследований. Так в [2] исследуется влияние температуры электролита на качество получаемого покрытия. Однако для большинства гальванических процессов существует необходимость строгого поддерживания температуры в заданных пределах ±2°С, так как в противном случае возникающие колебания напряжения в наращиваемом слое покрытия вызовут растрескивание и отслаивание покрытия. В [3] рассматриваются вопросы регулирования кислотности и концентрации компонентов электролита. Вследствие незначительного перенапряжения водорода и высокой катодной поляризации гальванический процесс весьма чувствителен даже к небольшим изменениям кислотности, что влечет за собой снижение рассеивающей способности электролита. Данные факты не позволяют выбрать в качестве основного технологического управляющего воздействия на структуру осадков температуру и кислотность электролита. Неравномерность толщины покрытия связана, прежде всего, с различиями в распределении плотности тока на поверхности сложнопрофилированных изделий, которые обусловлены неоднородностью электрического поля в электролизерах и неодинаковым сопротивлением электролита между анодом и различными участками покрываемой детали [4]. В связи с этим применяются нестационарные режимы электролиза [5] (реверсивный, импульсный и ассиметричный ток), включающие изменение формы и параметров тока с целью замедления роста покрытия на участках с повышенными плотностями тока, предоставляя возможность получать более качественные катодные покрытия, чем при электролизе с прямым током. Одним из основных способов управления в геометрических факторах, оказывающих влияние на равномерность распределения толщины гальванического покрытия, является межэлектродное расстояние. Поэтому для регулирования распределения плотности тока на поверхности детали и зашиты от избыточного концентрирования на ее краях силовых линий тока аноду придают форму, воспроизводящую очертания поверхности катода [6], применяют защитные экраны [7] и биполярные электроды [8], имеющие бо́льшую электропроводность, чем электролит в межэлектродном пространстве. Однако существование ограничений как на формы и стоимость изготовления фигурных анодов, так и на занимаемые положения защитных экранов и биполярных электродов, связанных с технической реализацией конструкции перемещающих устройств, сделало эффективность применения данного способа управления для нанесения покрытий на детали сложной формы незначительной.

Наибольшего эффекта (в плане снижения неравномерности) можно достичь сочетанием технологических и конструктивных управляющих конфигураций. Основная идея предлагаемого технологического процесса нанесения гальванического покрытия предусматривает разбиение монолитного анода на систему из прямоугольных анодных секций с возможностью подачи на каждую из них различной величины силы тока. В свою очередь получение наиболее равномерного покрытия на поверхности сложнопрофилированных изделий не предоставляется возможным без поиска оптимальных значений величин силы анодных токов.

Целью настоящей работы является поиск оптимального управления токовыми режимами гальванических процессов в ваннах со многими анодами с учетом разнообразия номенклатуры покрываемых изделий для снижения неравномерности распределения толщины покрытия.

1. Гальванический процесс как объект управления. Для подвешивания анодов в гальванических ваннах применяются штанги, которые укрепляют на бортах ванны при помощи колодок. Штанги соединяются между собой общим токоподводом. При таком подходе сила тока не подлежит регулированию на каждом из анодов. В предлагаемом подходе каждая из анодных секций подвешивается на своем участке штанги, отделенном с обеих сторон изоляционным материалом. Каждый участок такой штанги снабжается своим элементом токоподвода, шина от которого в свою очередь соединяется с общим источником питания ванны через устройство, позволяющее задавать различную величину силы тока для каждой анодной секции.

Рассмотрим предлагаемый гальванический процесс как объект управления (рис. 1), выделив конечное множество входных и выходных координат, а также возмущающих воздействий и вектора управления.

В качестве вектора входных параметров X объекта управления рассматривается конфигурация и расположение в ванне каждого анода из системы секций  $S_{a_1}, ..., S_{a_j}, ..., S_{a_N}$ , а также конфигурация и расположение в ванне обрабатываемой детали  $S_c$ , концентрация *i*-го компонента электролита  $C_i$ , качество H предварительной поверхностной подготовки детали, уровень L и температура t электролита (вектор входных координат).

С выхода Y объекта управления снимается информация о распределении толщины слоя покрытия  $\delta$  по поверхности детали и длительности T гальванического процесса (вектор выходных координат).

В качестве управления *и* на объект принимается сила тока  $I_{a_j}$  для *j*-го анода из системы секций  $S_{a_1}, ..., S_{a_j}, ..., S_{a_j}$  (вектор управлений).

К числу внешних измеряемых и не измеряемых возмущений *f* относится: наличие в электролите посторонних примесей *P*, поверхностные дефекты *D* детали, вынос электролита *Q* из ванны



Рис. 1. Гальванический процесс как объект управления

поверхностью детали, испарение электролита E с зеркала ванны, прерванный электрический контакт B в процессе нанесения покрытия и опыт оператора O гальванической линии (вектор возмущений). Несмотря на то, что внешние возмущения носят стохастический характер, их влияние на гальванический процесс можно снизить или предотвратить, если уделять должное внимание вопросам выбора гальванооборудования для подготовки и нанесения покрытий и надлежащему уходу за ним, проводить периодический анализ состава электролитов, осуществлять входной контроль покрываемых деталей, а также переподготовку и повышение квалификации оператора-гальваника.

**2.** Постановка задачи оптимального управления процессом. Выбор оптимального режима электролиза должен в итоге обеспечить минимальную себестоимость единицы продукции за счет экономичности процесса электролиза, важнейшими факторами которого являются толщина наносимого покрытия и длительность процесса нанесения.

Для большинства электролитов характерна возрастающая катодная поляризационная кривая, вследствие чего получение наиболее равномерного покрытия возможно при минимально допустимых плотностях тока, ниже которых покрытие не осаждается. Работа на низких плотностях тока увеличивает длительность процесса за счет снижения выхода металла по току. В то же время для форсирования процесса и повышения производительности линии в целом желательно работать с максимальной плотностью тока.

Критерий неравномерности покрытия *R* представляет собой отношение среднего распределения толщины осажденного металла к заданной δ<sub>min</sub> минимальной толщине слоя:

$$R = \frac{1}{S_c} \int_{S_c} \frac{\delta(x, y, z)}{\delta_{\min}} \mathrm{d}S_c, \qquad (2.1)$$

где  $S_c$  — поверхность катода; x, y, z — пространственные координаты точки, принадлежащей поверхности катода;  $\delta_{\min}$  — минимальная толщина покрытия на поверхности катода, определяемая технологическим регламентом:

$$\delta_{\min} = \min_{(x,y,z) \in S_c} \delta(x,y,z), \tag{2.2}$$

δ – толщина покрытия на поверхности катода:

$$\delta(x,y,z) = \frac{\Im}{\rho} \eta(x,y,z) i_c(x,y,z) T, \qquad (2.3)$$

где Э – электрохимический эквивалент металла; ρ – плотность наносимого металла; η – катодный выход по току; *i<sub>c</sub>* – плотность катодного тока.

Длительность гальванического процесса Т, согласно закону М. Фарадея, определяется как

$$T = \frac{\rho \delta_{\min}}{\overline{\eta} \, \overline{i_c} \, \Im},\tag{2.4}$$

где  $\overline{\eta}$ ,  $\overline{i_c}$  – средние значения выхода по току и плотности катодного тока.

При решении задачи поиска оптимальных воздействий необходимо обеспечить наименьшую неравномерность распределения слоя покрытия при наименьшей длительности гальванического процесса. Каждый из этих факторов может выступать в качестве критерия решения. Сведем двухкритериальную задачу к однокритериальной. Пусть  $R^*$ ,  $T^*$  — минимумы критериев (2.1) и (2.4). Введем невязки, определяющие неоптимальность выполнения каждого критерия:

$$r_1 = 1 - \frac{R^*}{R},$$
 (2.5)

$$r_2 = 1 - \frac{T^*}{T}.$$
 (2.6)

Таким образом, задача оптимального управления звучит следующим образом.

Найти силу тока  $I_{a_j}^*$  для *j*-го анода из системы секций  $S_{a_1}, ..., S_{a_j}, ..., S_{a_N}$  при заданной форме изделия-катода  $S_c$ , доставляющие минимум функции взвешенных квадратичных отклонений каждого критерия от своего оптимума:

$$\Psi(\alpha) = \alpha r_1^2 + (1 - \alpha) r_2^2 \to \min$$
(2.7)

при ограничении на значение параметра α:

$$0 \le \alpha \le 1 \tag{2.8}$$

и суммарную плотность токов на поверхности всех *N* анодов:

$$i_{\min} \le \sum_{j=1}^{N} \frac{I_{a_j}}{S_{a_j}} \le i_{\max},$$
 (2.9)

где *i*<sub>min</sub>, *i*<sub>max</sub> – предельно допустимые величины плотностей тока.

**3.** Разработка математической модели процесса. В целях поиска оптимального управляющего воздействия перейдем к разработке математической модели для рассматриваемого процесса. Для этого примем следующие допущения [9]:

1) магнитная проницаемость, плотность и удельное сопротивление электролита принимаются константами ввиду малых допустимых изменений значений компонентов, входящих в состав электролита;

2) электрическое поле внутри электродов изотропное, так как электропроводность электролита на несколько порядков ниже электропроводности металлов;

3) функция катодной поляризации зависит только от плотности тока;

4) отсутствует зависимость электропроводности и температуры электролита от пространственных координат;

5) на поверхности электродов не существует шероховатости, а их проводимость идеальна;

6) наличие внутри ванны устройств для крепления покрываемых изделий не учитывается.

Катодный выход по току в уравнении (2.3) зависит от температуры t, катодной плотности  $i_c$  тока и концентрации C основных компонентов электролита:

$$\eta(x, y, z) = \eta(t, i_c(x, y, z), C_1, C_2, ...),$$
(3.1)

где C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, ... – концентрации основных компонентов, оказывающих влияние на состав электролита.

Для вычисления плотностей тока воспользуемся законом Г.С. Ома в дифференциальной форме:

$$i_{a_i}(x, y, z) = -\chi(\nabla \varphi(x, y, z), \vec{n}_{a_i}), \quad (x, y, z) \in S_{a_i},$$
(3.2)

$$i_c(x,y,z) = \chi(\nabla \varphi(x,y,z),\vec{n}_c), \quad (x,y,z) \in S_c,$$
(3.3)

ИЗВЕСТИЯ РАН. ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ № 1 2019

где  $i_{a_j}$ ,  $i_c$  – плотности тока на *j*-м аноде и катоде;  $\nabla \phi$  – градиент потенциала электрического поля в объеме электролита;  $\vec{n}_{a_j}$  и  $\vec{n}_c$  – нормали к поверхности *j*-го анода и катода;  $\chi$  – удельная электропроводность электролита.

Распределение потенциала в объеме электролита описывается дифференциальным уравнением в частных производных эллиптического типа:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x,y,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x,y,z)}{\partial z^2} = 0.$$
(3.4)

Распределение потенциала (3.4) ограничено стенками и дном ванны, а также границей "электролит—воздух", что выражается краевым условием

$$\frac{\partial \varphi(x,y,z)}{\partial \vec{n}_{ins}}\Big|_{S_{ins}} = 0, \tag{3.5}$$

где  $S_{ins}$  и  $\vec{n}_{ins}$  – поверхность изолятора и нормаль к ней.

Граница "электролит—*j*-й анод" описывается краевым условием

$$\varphi(x,y,z) + F_a(i_{a_j}(x,y,z))\Big|_{S_{a_j}} = U_{a_j},$$
(3.6)

где  $F_a$  — функция анодной поляризации;  $U_{a_i}$  — напряжение j-го анода.

Границу "электролит-катод" определяет следующее краевое условие:

$$\varphi(x,y,z) + F_c \left( i_c(x,y,z) \right)_{S_c} = 0, \tag{3.7}$$

где  $F_c$  — функция катодной поляризации. Тогда общий ток *I* через электролизер можно получить на основе равенства суммы частных токов, проходящих через поверхности *N* анодов, току через поверхность катода:

$$\sum_{j=1}^{N} I_{a_j} = I_c = I,$$
(3.8)

где сила тока сквозь поверхность электродов определяется через поток вектора плотности тока:

$$I_{a_j} = \oint_{S_{a_j}} i_{a_j}(x, y, z) \mathrm{d}S_{a_j}, \tag{3.9}$$

$$I_c = \oint_{S_c} i_c(x, y, z) \mathrm{d}S_c. \tag{3.10}$$

Уравнения (3.1)—(3.10) представляют собой математическую модель гальванического процесса, связывающую минимизируемый критерий (2.7) с управляющими воздействиями, задаваемыми сочетанием граничного условия (3.6) и уравнениями (3.8), (3.9).

Для решения данных уравнений пространство гальванической ванны аппроксимируется сеткой и вместо производных функции распределения потенциала электролита в объеме гальванической ванны рассматриваются их приближенные неявные разностные формулы в узлах сетки. Полученный набор уравнений в частных производных эллиптического типа заменяется системой алгебраических уравнений, решение которой отыскивается методом простых итераций, в свою очередь метод нижней релаксации используется для уравнений по анодным (3.2) и катодной (3.3) плотностям тока [10].

**4.** Теоретические и экспериментальные исследования. Для исследования адекватности уравнений предложенной авторами математической модели гальванического процесса была проведена серия экспериментов по нанесению никелевого гальванического покрытия на изделие Z-образной формы с использованием двуханодной и одноанодной ванн. Длина, ширина и высота гальванических ванн составляли  $50 \times 30 \times 50$  см ( $L_1 \times L_2 \times L_3$ ). В качестве монолитного анода использовалась никелевая пластина размером  $30 \times 1 \times 30$  см, анодной секции –  $15 \times 1 \times 30$  см. Размеры Z-образного катода составляли  $40 \times 1 \times 20$  см. Аноды размещались от стенок ванны на расстоянии 3 см. Ванна заполнена на 45 см сульфатным электролитом Уоттса с кислотностью 2.5–3 и составом компонентов *C*, г/л: NiSO<sub>4</sub> – 200–250; NiCl<sub>2</sub> – 30–60; H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> – 25–40. Температура *t* раствора поддерживалась в диапазоне  $40-45^{\circ}$ С.



Рис. 2. Распределение потенциала в сечении электролита для одноанодной (а) и двуханодной (б) гальванических ванн

В результате компьютерного моделирования были получены распределения потенциала в пространстве электролита для одноанодной и двуханодной гальванических ванн (рис. 2). Величина силы тока для одноанодной ванны составляла  $I_a = 14$  A, для двуханодной –  $I_{a_1} = 9$  A и  $I_{a_2} = 5$  A.

Из рис. 2 видно, что в двуханодной ванне существует возможность варьирования распределением потенциала в пространстве ванны, позволяя уменьшить плотность тока на более нагруженных участках и увеличить ее на менее нагруженных участках катода, что повлечет за собой снижение неравномерности распределения гальванического покрытия.

На рис. 3 демонстрируются распределения толщины никелевого покрытия по поверхности Z-образного катода с использованием одно- и двуханодных ванн по достижению  $\delta_{min} =$ = 10 мкм. Измерение среднего значения нанесенного никелевого покрытия осуществлялось по ГОСТ 9.302-88 толщиномером "Константа К5". Толщиномер имеет погрешность измерения ±1 мкм в диапазоне 0–100 мкм с разрешающей способностью 0.1 мкм. Каждый эксперимент повторялся 3 раза с последующим усреднением измеренной толщины покрытия в геометрически эквивалентных друг другу точках на поверхности изделия для уменьшения влияния случайных факторов.

Полученные значения критериев неравномерности для одно- и двуханодной ванны составили  $R_1 = 4.830462$  и  $R_2 = 3.150748$  при одинаковой длительности процесса T = 45 мин. Таким образом, предлагаемый процесс позволяет достигать минимальной регламентированной толщины покрытия за одинаковое с монолитным анодом время, причем распределение толщины покрытия по поверхности изделия получается более равномерным.





**Рис. 3.** Развертка распределения толщины покрытия по поверхности катода с использованием одноанодной (а) и двуханодной (б) гальванических ванн:  $S_c^x$ ,  $S_c^z$  – длина и высота катода

Проведем исследование влияния параметра  $\alpha$  на качество покрытия и длительность процесса. В таблице показаны значения целевого критерия (2.7) и частных критериев (2.1), (2.4) в зависимости от изменения величины параметра  $\alpha$ , а также времени поиска  $\tau$  оптимального управления (при величине шага сетки 0.5 см по всем пространственным координатам).

На рис. 4 приводится внешний вид поверхности критерия оптимальности (2.7) в зависимости от величины параметра  $\alpha$  с учетом ограничения на управляющие воздействия (2.9), диапазон изменения которых для процесса никелирования составляет 0.01–0.03 А/см<sup>2</sup>.

Из рис. 4 видно, что уже при поиске двух оптимальных управляющих воздействий при некоторых значениях параметра α (α = 0.5) в рельефе целевого критерия наблюдается ярко выраженный "овраг". Следовательно, для поиска оптимальных управляющих воздействий целесообразно использование метода И.М. Гельфанда [11]. При любой другой форме катодной поляризацион-

Критерий	Параметр α		
	0.1	0.5	0.9
Ψ	0.049166	0.221705	0.051021
R	8.214591	5.200361	2.456887
Т, мин	22	38	76
τ, мин	121	157	134

Таблица 1. Результаты решения задачи оптимального управления



**Рис. 4.** Значения критерия оптимальности при  $\alpha = 0.1$  (a), 0.5 (б) и 0.9 (в)

ной кривой (монотонно убывающая, N-образная) результаты поиска оптимальных управляющих воздействий зависят от геометрии изделия не столь очевидным образом.

**5.** Архитектура системы управления. Для реализации рассматриваемого технологического процесса предлагается использовать систему управления с трехуровневой архитектурой, схема которой продемонстрирована на рис. 5.

На верхнем уровне с участием оперативного персонала (технологи, конструкторы) решаются задачи ввода исходной информации, моделирования распределения толщины покрытия по поверхности изделия и длительности процесса и поиска оптимальных параметров управления со-



Рис. 5. Архитектура системы управления многоанодными гальваническими процессами

гласно задаче (2.7), визуализации полученных результатов. Верхний уровень системы управления реализуется посредством автоматизированного рабочего места (APM) оператора на базе электронной вычислительной машины (ЭВМ) со специализированным программным обеспечением.

Найденный результат (силы тока на анодных секциях) решения задачи (2.7), а также пуск и останов оборудования реализует программируемый логический контроллер на среднем уровне. Задание полученных оптимальных параметров (уставок для контроллера) может производиться не только посредством оператора APM, но и с использованием панели ввода и воспроизведения данных.

На нижнем уровне происходит сбор данных о параметрах гальванического процесса (датчиками измерения постоянного тока) и состоянии оборудования (источника питания). Посредством исполнительного механизма (регуляторов постоянного тока) реализуется найденный режим протекания гальванического процесса в многоанодной ванне. 6. Предварительный поиск оптимальных управлений. Проблема чрезвычайной длительности поиска оптимальных управлений, которая наблюдается уже при двух анодах (см. таблица 1), и необходимости управления гальваническими процессами для широкой номенклатуры обрабатываемых изделий в режиме реального времени приводит к требованию использования в контуре управления быстродействующей ЭВМ. Повышение скорости решения задачи методом "оврагов" возможно достигнуть не только аппаратным, но и программным путем. Ввиду независимости этапов поиска значений целевого критерия для осуществления овражного шага к точке его минимума можно применить механизмы распараллеливания задачи, объединяя разнородный набор ЭВМ в общий вычислительный ресурс. Однако даже самые современные вычислительные средства и программные алгоритмы не позволят оперативно рассчитать управления, особенно при необходимости их расчета для многих различных деталей, поступающих одновременно на обработку. В таком случае предлагается использовать процедуры предварительного поиска управлений.

Рассмотрим более подробно процедуру предварительного поиска оптимальных управлений. Пусть K — количество сложнопрофилированных изделий из номенклатуры деталей, подлежащих гальванической обработке для конкретного производства. Найдем для заданного вектора входных координат  $X_k$ , k = 1, ..., K, оптимальные значения управлений  $u_k$ , доставляющие экстремум вектора выходных координат  $Y_k$ , решив задачу (2.7) при  $l_k$  раз изменяемой величине параметра  $\alpha_k$ . Этот поиск может осуществляться с использованием кластера мощных вычислительных средств (не обязательно входящих в систему управления конкретным гальваническим процессом) либо через облачные технологии.

Найденные значения входных координат, выходных координат и соответствующие им оптимальные управления сведем вместе и назовем матрицей управления  $\Theta$ :

$$\Theta = \begin{pmatrix} X_1, Y_1, u_1 \\ \dots \\ X_k, Y_k, u_k \\ \dots \\ X_K, Y_K, u_K \end{pmatrix},$$
(6.1)

каждая строка в которой представляет собой набор из трех векторов:

$$X_{k} = \{S_{a_{k1}}, \dots, S_{a_{kj}}, \dots, S_{a_{kN}}, S_{kc}, C_{k1}, C_{k2}, \dots, H_{k}, L_{k}, t_{k}\},$$
(6.2)

$$Y_{k} = \{Y_{k1}, \dots, Y_{kl}, \dots\} = \{(\alpha_{k1} | \delta_{k1}, T_{k1}), \dots, (\alpha_{kl} | \delta_{kl}, T_{kl}), \dots\},$$
(6.3)

$$u_{k} = \{u_{k1}, \dots, u_{kl}, \dots\} = \{(\alpha_{k1} | I_{ak_{1}}^{1}, \dots, I_{a_{kj}}^{1}, \dots, I_{a_{kj}}^{1}), \dots, (\alpha_{kl} | I_{ak_{1}}^{l}, \dots, I_{a_{kj}}^{l}, \dots, I_{a_{kj}}^{l}), \dots\},$$
(6.4)

где (a|b) – значения *b*, найденные для изменяемой величины *a*.

Оптимальные значения критериев (6.3) не используются при управлении и служат справочной информацией для оператора APM как характеристики совершенства *l*-го управления при заданном значении α.

Матрица управления (6.1) хранится на ЭВМ верхнего уровня системы управления. Для вновь поступающей на гальваническую обработку партии изделий отыскивается строка матрицы управления (6.1), для которой выполняется условие

$$((X = X_k) \land (\exists Y_{kl})) \Rightarrow (u \coloneqq u_{kl}).$$
(6.5)

Если такая строка найдена, то оператор APM задает соответствующие уставки  $u_k$  из матрицы управления.

Поскольку матрица управления имеет конечное число элементов, возможна ситуация, когда условие (6.5) не выполняется ни для одной строки матрицы управления. В этом случае используются воздействия, близкие к оптимальным. Тогда способ предварительного поиска управлений модифицируется следующим образом.

Для поставленной задачи оптимального управления проверяется условие

$$\exists |X - X_k| \to 0 \Rightarrow \{(|Y - Y_{kl}| \to 0) \land (|u - u_{kl}| \to 0)\},$$
(6.6)

где X – вектор входных координат, для которого отсутствуют найденные векторы выходных координат Y и управления u в матрице (6.1);  $|X - X_k|$  – разность между соответствующими значе-

ИЗВЕСТИЯ РАН. ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ № 1 2019

ниями компонентов входного вектора и *k*-го вектора из матрицы (6.1);  $|Y - Y_{kl}|$ ,  $|u - u_{kl}|$  – разности между значениями компонентов выходного вектора и вектора управления и *k*-ми соответствующими векторами из матрицы (6.1).

Выполнение условия (6.6) означает, что близость значений входных координат обеспечивает близость управлений и частных критериев оптимальности в соответствующих метриках. Если условие (6.6) выполняется, то для управления объектом можно использовать воздействия  $u_k$ , взятые из k-й строки матрицы управления для значений  $X_k$ , наиболее близких к требуемому X. Однако в этом случае управление, выданное на объект, не будет оптимальным, а лишь допустимым.

При k = K и  $K \to \infty$  точность выполнения левой части условия (6.6) возрастает, а допустимое управление  $u_{kl}$  стремится к оптимальному u.

Заключение. Подходы, сочетающие технологические и конструктивные воздействия на управление гальваническими процессами, представляются весьма перспективными с точки зрения получения более равномерного гальванического покрытия на изделии. Использование многосекционных анодов взамен монолитных позволяет усилить влияние технологических управляюших воздействий, а легкость в нарашивании числа анодных секций дает возможность удешевить реализацию конструктивных управляющих воздействий при обработке сложнопрофилированных изделий. Выбор значения параметра в задаче получения более равномерного гальванического покрытия зависит от объема партии изделий, ее повторяемости в годовой программе, номенклатуры обрабатываемой продукции и подбирается индивидуально для каждого типа производства. Эффективность (в плане снижения неравномерности покрытия) применения двуханодной ванны без повышения ллительности процесса в рассмотренном примере составила 36%. Отыскание решений поставленной задачи при разнообразной номенклатуре обрабатываемых изделий предлагается осуществлять путем предварительного поиска с формированием матрицы управления. Количество элементов в строке такой матрицы в общем случае различно, вследствие чего необходимо использование постреляционной модели данных, которая реализуется в современных объектно-ориентированных системах управления базами данных. Невозможность предварительного нахожления множества всех оптимальных управлений для каждого вектора входных координат ввиду многообразия возможных форм обрабатываемых изделий и составов электролитов обуславливает пополняемость строк в матрице. Увеличение числа предварительно найденных решений позволяет отыскать наиболее близкое к оптимальному допустимое управление для впервые поступающей на гальваническую обработку партии изделий за приемлемый промежуток времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Wu. T.* Application of PLC in the Electroplating Automation Manufacture // Advances in Mechanical and Electronic Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. V. 177. P. 13–18.
- 2. Галлямов А.Р., Ганигин С.Ю., Кретов С.С., Марков А.С., Марков В.С. Информационно-измерительная система для исследования процесса электрохимического осаждения покрытий // Изв. Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4(2). С. 334–338.
- Tenno R., Kantola K., Koivo H. Electroless Nickel Plating: Bath Control // IFAC Proceedings. 2005. V. 38 (1). P. 339–344.
- 4. *Каданер Л.И*. Равномерность гальванических покрытий. Харьков: Изд-во Харьковск. гос. ун-та, 1961. 414 с.
- Dini J.W., Johnson H.R. The Properties of Gold Deposits Produced by DC, Pulse and Asymmetric AC Plating // Gold Bulletin. 1980. V. 13(1). P. 31–34.
- 6. *Garich H., Shimpalee S., Lilavivat V., Snyder S., Taylor E.J.* Non-Traditional Cell Geometry for Improved Copper Plating Uniformity // J. Electrochem. Soc. 2016. V. 163 (8). P. 216–222.
- 7. *Lavelaine de Maubeuge H*. Calculation of the Optimal Geometry of Electrochemical Cells: Application to the Plating on Curved Electrodes // J. Applied Electrochemistry. 2002. V. 149(8). P. 413–422.
- 8. Литовка Ю.В., Михеев В.В. Численный расчет электрического поля в гальванической ванне с биполярными электродами // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 40. № 3. С. 328–334.
- Deconinck J. Mathematical Modelling of Electrode Growth // J. Applied Electrochemistry. 1994. V. 24 (3). P. 212–218.
- 10. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука. 1980. 608 с.
- 11. *Гельфанд И.М., Цетлин М.Л.* О некоторых способах управления сложными системами // УМН. 1962. Т. 17. № 1. С. 3–25.