

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕВЕРСИВНЫМ РЕЖИМОМ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ В ВАННЕ СО МНОГИМИ АНОДАМИ

В. В. Конкина<sup>1</sup>, Д. С. Соловьев<sup>2</sup>, Ю. В. Литовка<sup>1</sup>

*Кафедры: «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» (1);  
konkina-tstu@yandex.ru; «Информационные системы и защита информации» (2),  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*

**Ключевые слова:** ванна со многими анодами; гальванические процессы; неравномерность покрытия; объект управления; оптимальное управление; реверсивный режим.

**Аннотация:** Рассмотрены традиционные подходы к снижению неравномерности гальванических покрытий. Приведен ряд работ, сочетающих в себе комбинации таких подходов с использованием гальванических ванн со многими анодами. Предложен технологический процесс нанесения гальванических покрытий, сочетающий в себе реверсивный режим с применением ванн со многими анодами. Данный режим рассмотрен как объект управления, для которого выявлены входные, выходные, возмущающие и управляющие воздействия. Поставлена задача оптимального управления по критерию неравномерности распределения толщины гальванического покрытия по поверхности изделия, для которой разработана математическая модель динамики с распределенными координатами.

### Обозначения

$B$ – состояние поверхности покрываемого металла;	$T$ – длительность нанесения покрытия, ч;
$C$ – концентрация компонентов электролита, г/л;	$t$ – температура, °С;
$c$ – скорость света в вакууме, м/с <sup>2</sup> ;	$S$ – площадь поверхности, м <sup>2</sup> ;
$E$ – вынос электролита в процессе промывки;	$U$ – напряжение между многосекционным анодом и катодом, В;
$F_1, F_2$ – функции анодной и катодной плотности тока, В;	$u$ – управляющие воздействия;
$f$ – внешние стохастические возмущения;	$X$ – входные воздействия;
$H$ – качество предварительной обработки поверхности изделия (катода);	$Y$ – выходные управляемые воздействия;
$I$ – матрица активных анодных секций;	$\delta(x, y, z, \tau)$ – толщина покрытия на поверхности катода в момент времени $\tau$ , мкм;
$i$ – плотность тока, А/м <sup>2</sup> ;	$\eta$ – выход по току, %;
$K$ – концентрация посторонних ионов в электролите, г/л;	$\mu$ – безразмерная магнитная проницаемость электролита;
$L$ – уровень электролита, м;	$\rho$ – плотность металла покрытия, кг/м <sup>3</sup> ;
$\bar{n}$ – нормаль;	$\tau$ – произвольный момент времени, с;
$O$ – квалификация оператора;	$\nu$ – число периодов включения «прямого» и «обратного» токов, шт.;
$R$ – безразмерный критерий неравномерности;	$\varphi(x, y, z, \tau)$ – потенциал электрического поля в точке гальванической ванны с координатами $(x, y, z)$ в момент времени $\tau$ , В;
$x, y, z$ – координаты точки в пространстве гальванической ванны;	$\chi$ – электропроводность электролита, (Ом·см) <sup>-1</sup> ;

Э – электрохимический эквивалент вещества, кг/(А·ч).

#### Индексы

*a* – анодная секция;

*ins* – изолятор;

*j* – номер включения «прямого» или «обратного» токов;

*k* – катод;

*M, N* – число горизонтальных рядов и анодных секций в каждом горизонтальном ряду соответственно, шт.;

*m, n* – индексы анодной секции;

*max, min* – максимальное и минимальное значения;

*зад* – заданное значение;

прям, обр – «прямой» и «обратный» режимы реверсирования тока.

## Введение

Гальванические процессы активно применяются в промышленности для нанесения защитных, декоративных и других функциональных металлических покрытий на выпускаемые предприятиями изделия. Гальванические покрытия должны иметь равномерную толщину на различных участках покрываемых изделий – выступах, углублениях, граничных переходах. Данное требование имеет особенно важное значение при покрытии изделий сложной конфигурации. Неравномерное распределение толщины покрытия приводит к браку, перерасходу металла и электроэнергии, требует дополнительной механической обработки изделия.

Для снижения неравномерности гальванических покрытий используются следующие подходы:

- 1) поиск оптимальных электрических режимов;
- 2) поддержание заданных регламентом технологических параметров;
- 3) поиск оптимальных геометрических конфигураций ванн и электродов.

К электрическим методам относится применение нетрадиционных режимов источников питания: реверсивного [1], импульсного [2] и асимметричного переменного тока [3]. Технологическими параметрами выступают температура [4] и концентрация компонентов электролита [5]. Снижения неравномерности посредством подбора геометрических конфигураций достигают применением фигурного анода [6], токонепроводящего перфорированного экрана [7], биполярных электродов [8], а также ванн со многими анодами [9].

Однако существует ряд работ, сочетающих в себе комбинации данных подходов для воздействия на распределение толщины гальванического покрытия. В таких работах описываются следующие гальванические процессы:

- 1) с независимыми источниками питания, напряжения от которых различные [10];
- 2) перемещающимися анодами, меняющими конфигурацию электрического поля [11];
- 3) циклически переключающимися анодными секциями [12].

Недостатки данных подходов:

- 1) высокая стоимость дополнительного оборудования (наличие, по меньшей мере, двух источников питания);
- 2) сложность аппаратной реализации системы управления перемещением анодов в пространстве гальванической ванны;
- 3) снижение производительности гальванической ванны.

На основе выявленных недостатков существующих технических решений в данной предметной области можно сделать вывод, что усовершенствование комбинационных подходов с использованием ванн со многими анодами должно заключаться в простоте технической реализации, снижении стоимости необходимого оборудования и повышении производительности гальванической ванны

при нанесении более равномерных покрытий. Таким образом, предложен новый подход к снижению неравномерности распределения толщины гальванического покрытия на основе использования реверсивного режима в гальванической ванне со многими анодами.

Цель работы – постановка задачи оптимального управления реверсивным режимом нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами.

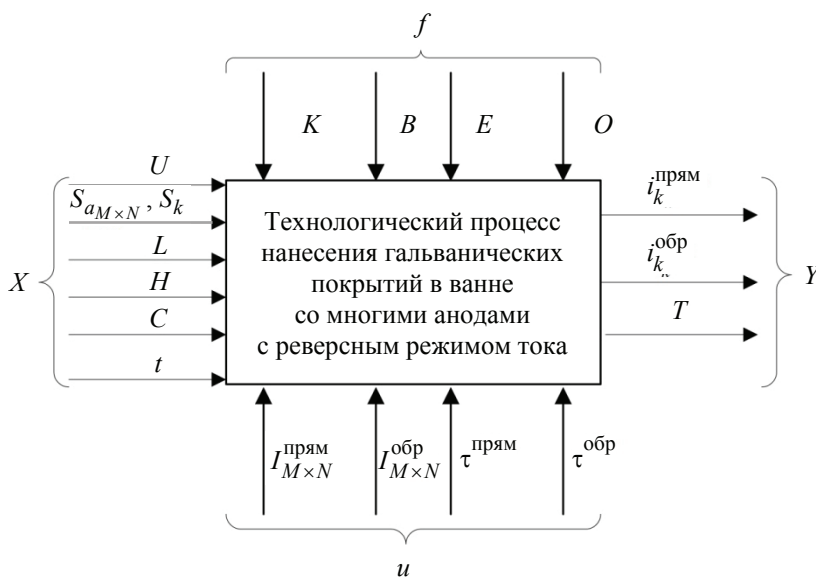
### Гальванический процесс нанесения покрытия в ванне со многими анодами в режиме реверсирования как объект управления

Сущность предлагаемого технического решения заключается в разбиении монолитного анода на систему из  $M \times N$  плоских анодных секций, подключаемых к общему источнику питания через устройство, позволяющее при реализации «прямого» и «обратного» реверсивных режимов, отключать от источника питания требуемые анодные секции. При этом отключаемые анодные секции, а также длительность «прямого» и «обратного» режимов реверсирования, рассчитываются исходя из получения наиболее равномерного покрытия на поверхности изделия.

Чтобы осуществить оптимальное управление предложенным технологическим процессом, необходимо измерить, проанализировать и отрегулировать ряд параметров. Для этого рассмотрим данный процесс как объект управления (рис. 1).

На описываемый технологический процесс влияют внешние стохастические возмущения  $f$ : концентрация посторонних ионов в электролите  $K$ ; состояние поверхности покрываемого металла  $B$ ; вынос электролита в процессе промывки  $E$ ; квалификация оператора  $O$ .

Входные воздействия  $X$ , обеспечивающие желаемое проведение технологического процесса: анодное напряжение  $U$ ; геометрия используемых электродов  $S_{a_{M \times N}}, S_k$ ; качество предварительной обработки поверхности изделия (катада)  $H$ ; концентрация компонентов электролита  $C$ ; уровень  $L$  и температура  $t$  электролита.



**Рис. 1. Схема гальванического процесса как объекта управления**

Выходные управляемые воздействия  $Y$ : катодная плотность при «прямом»  $i_k^{\text{прям}}$  и «обратном»  $i_k^{\text{обр}}$  режимах реверсирования тока; длительность технологического процесса  $T$ .

Управляющие воздействия  $u$ : матрицы активных анодных секций при реверсивном режиме  $I_{M \times N}^{\text{прям}}$  и  $I_{M \times N}^{\text{обр}}$  с длительностями «прямого»  $\tau^{\text{прям}}$  и «обратного»  $\tau^{\text{обр}}$  включений.

Матрицы активных анодных секций:  
для режима «прямого» включения

$$I_{M \times N}^{\text{прям}}(\tau) = \begin{pmatrix} I_{1,1}^{\text{прям}}(\tau) & \dots & I_{1,n}^{\text{прям}}(\tau) & \dots & I_{1,N}^{\text{прям}}(\tau) \\ I_{m,1}^{\text{прям}}(\tau) & \dots & I_{m,n}^{\text{прям}}(\tau) & \dots & I_{m,N}^{\text{прям}}(\tau) \\ I_{M,1}^{\text{прям}}(\tau) & \dots & I_{M,n}^{\text{прям}}(\tau) & \dots & I_{M,N}^{\text{прям}}(\tau) \end{pmatrix}; \quad (1)$$

«обратного» режима

$$I_{M \times N}^{\text{обр}}(\tau) = \begin{pmatrix} I_{1,1}^{\text{обр}}(\tau) & \dots & I_{1,n}^{\text{обр}}(\tau) & \dots & I_{1,N}^{\text{обр}}(\tau) \\ I_{m,1}^{\text{обр}}(\tau) & \dots & I_{m,n}^{\text{обр}}(\tau) & \dots & I_{m,N}^{\text{обр}}(\tau) \\ I_{M,1}^{\text{обр}}(\tau) & \dots & I_{M,n}^{\text{обр}}(\tau) & \dots & I_{M,N}^{\text{обр}}(\tau) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$I_{m,n}^{\text{прям}}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{если } m, n\text{-я секция отключена от «плюса» источника питания;} \\ 1, & \text{если } m, n\text{-я секция подключена к «плюсу» источника питания;} \end{cases}$$

$$I_{m,n}^{\text{обр}}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{если } m, n\text{-я секция отключена от «минуса» источника питания;} \\ 1, & \text{если } m, n\text{-я секция подключена к «минусу» источника питания.} \end{cases}$$

Выходные управляемые воздействия  $Y$ , согласно закону Фарадея, являются величинами, формирующими толщину гальванических покрытий.

### Математическая постановка задачи оптимального управления

С учетом принятых обозначений приведем математическую постановку задачи оптимального управления рассматриваемым процессом.

Найдем матрицы активных анодных секций для «прямого»  $I_{M \times N}^{\text{прям}}(\tau)$  и «обратного»  $I_{M \times N}^{\text{обр}}(\tau)$  режимов реверсивного гальванического процесса, а также длительности  $\tau^{\text{прям}}$ ,  $\tau^{\text{обр}}$  таких периодов, доставляющие минимум критерию неравномерности распределения толщины наносимого покрытия

$$R(\tau) = \frac{I}{\|S_k\|} \int_{S_k} \frac{\delta(x, y, z, \tau) - \delta^{\min}(\tau)}{\delta^{\min}(\tau)} dS_k + \frac{\delta^{\max}(\tau) - \delta^{\min}(\tau)}{\delta^{\min}(\tau)} \rightarrow \min, \quad (3)$$

при этом должно выполняться следующее ограничение:

$$\delta^{\min}(T) \geq \delta^{\text{zad}}, \quad (4)$$

где  $\delta^{\text{zad}}$  – заданная толщина гальванического покрытия.

Для определения связи критерия неравномерности (3) с варьируемыми переменными запишем систему уравнений математической модели описываемого процесса.

Прирост толщины покрытия изделия в течение  $j$ -го «прямого» включения тока

$$\delta_j^+(x, y, z, \tau_j^{\text{прям}}) = \frac{\Theta}{\rho} \int_0^{\tau_j^{\text{прям}}} \eta_k(x, y, z, \tau) i_k^{\text{прям}}(x, y, z, \tau) d\tau. \quad (5)$$

Уравнение уменьшения толщины покрытия в точке изделия с координатами  $(x, y, z)$  в течение  $j$ -го «обратного» включения тока

$$\delta_j^+(x, y, z, \tau_j^{\text{обп}}) = -\frac{\Theta}{\rho} \int_0^{\tau_j^{\text{обп}}} \eta_a(x, y, z, \tau) i_k^{\text{обп}}(x, y, z, \tau) d\tau. \quad (6)$$

Выходы по току  $\eta_a$  и  $\eta_k$  определяются аппроксимацией результатов лабораторных экспериментов и являются функциями температуры, плотности тока и концентрации компонентов электролита:

$$\eta_a(x, y, z, \tau) = \eta_k(t, i_k^{\text{обп}}(x, y, z, \tau), C_1, C_2, \dots); \quad (7)$$

$$\eta_k(x, y, z, \tau) = \eta_k(t, i_k^{\text{прям}}(x, y, z, \tau), C_1, C_2, \dots). \quad (8)$$

Толщина покрытия после  $\nu$  периодов включения «прямого» и «обратного» токов будет вычисляться следующим образом:

$$\delta(x, y, z, T) = \sum_{j=1}^{\nu} \left( \delta_j^+(x, y, z, \tau_j^{\text{прям}}) + \delta_j^-(x, y, z, \tau_j^{\text{обп}}) \right). \quad (9)$$

Для определения плотности тока на поверхности изделия  $S_k$  и анода  $S_{a_{M \times N}}$  из системы  $M \times N$  секций используем закон Ома в дифференциальной форме:

$$i_k^{\text{прям}}(x, y, z, \tau) = \chi \nabla \varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau) \Big|_{S_k}; \quad (10)$$

$$i_k^{\text{обп}}(x, y, z, \tau) = -\chi \nabla \varphi_{\text{обп}}(x, y, z, \tau) \Big|_{S_k}; \quad (11)$$

$$i_{a_{m,n}}^{\text{прям}}(x, y, z, \tau) = -\chi \nabla \varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau) \Big|_{S_{a_{m,n}}}; \quad (12)$$

$$i_{a_{m,n}}^{\text{обп}}(x, y, z, \tau) = \chi \nabla \varphi_{\text{обп}}(x, y, z, \tau) \Big|_{S_{a_{m,n}}}, \quad (13)$$

где  $\varphi_{\text{прям}}$ ,  $\varphi_{\text{обп}}$  – потенциалы электрического поля в гальванической ванне при «прямом» и «обратном» реверсивных режимах.

Распределение потенциала электрического поля ванны описывается дифференциальным уравнением в частных производных параболического типа:

$$\frac{\partial \varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{c^2}{4\pi\chi\mu} \left( \frac{\partial^2 \varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (14)$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{обп}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{c^2}{4\pi\chi\mu} \left( \frac{\partial^2 \varphi_{\text{обп}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{обп}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{обп}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right). \quad (15)$$

Краевые условия для «прямого» включения (14) имеют вид:

$$\left. \frac{\partial \varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau)}{\partial n} \right|_{S_{\text{ins}}} = 0; \quad (16)$$

$$\varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau) + F_1 \left( i_{a_{m,n}}^{\text{прям}}(x, y, z, \tau) \right) \Big|_{S_{a_{m,n}}} = U, \text{ если } I_{m,n}^{\text{прям}}(\tau) = 1, \quad (17)$$

$$\varphi_{\text{прям}}(x, y, z, \tau) - F_2 \left( i_k^{\text{прям}}(x, y, z, \tau) \right) \Big|_{S_k} = 0; \quad (18)$$

$$\varphi_{\text{прям}}(x, y, z, 0) = \varphi_{\text{прям}0}(x, y, z). \quad (19)$$

Для уравнения электрического поля (15) краевые условия примут вид:

$$\left. \frac{\partial \varphi_{\text{обр}}(x, y, z, \tau)}{\partial n} \right|_{S_{\text{ins}}} = 0; \quad (20)$$

$$\varphi_{\text{обр}}(x, y, z, \tau) + F_1 \left( i_k^{\text{обр}}(x, y, z, \tau) \right) \Big|_{S_k} = U; \quad (21)$$

$$\varphi_{\text{обр}}(x, y, z, \tau) - F_2 \left( i_{a_{m,n}}^{\text{обр}}(x, y, z, \tau) \right) \Big|_{S_{a_{m,n}}} = 0, \text{ если } I_{m,n}^{\text{обр}}(\tau) = 1; \quad (22)$$

$$\varphi_{\text{обр}}(x, y, z, 0) = \varphi_{\text{обр}0}(x, y, z). \quad (23)$$

Полученная система уравнений (5) – (23) представляет собой математическую модель динамики гальванического процесса, протекающего в реверсивном режиме в ванне со многими анодами, рассматриваемой как объект с распределенными координатами, и позволяет перейти к решению задачи оптимального управления приведенным процессом.

### Заключение

Предложен новый технологический процесс нанесения гальванического покрытия, протекающий в реверсивном режиме в ванне со многими анодами. Описанный процесс рассмотрен как объект управления, для которого поставлена задача оптимального управления, заключающаяся в поиске индексов активных анодных секций, включаемых при «прямом» и «обратном» реверсивных режимах, а также длительности таких включений для достижения наиболее равномерного покрытия по поверхности изделия. Для решения поставленной задачи разработана математическая модель, в систему уравнений которой входят законы Фарадея, Ома в дифференциальной форме и уравнение Лапласа в частных производных параболического типа, описывающее распределение потенциала в пространстве гальванической ванны со многими анодами для реверсивного режима нанесения покрытия.

### Список литературы

1. Litovka, Yu. V. Simulation and Optimization of Electroplating with Current Reversal / Yu. V. Litovka, A. V. Romanenko, A. V. Afanasev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 32, No. 3. – P. 266 – 269.
2. Pulse Current Electrodeposition and Corrosion Properties of Ni–W Alloy Coatings / M. Zemanová [et al.] // Journal of Applied Electrochemistry. – 2011. – Vol. 41. – P. 1077 – 1085.

3. Dini, J. W. The Properties of Gold Deposits Produced by DC, Pulse and Asymmetric AC Plating / J. W. Dini, H. R. Johnson // *Gold Bulletin*. – 1980. – Vol. 13. – P. 31 – 34.1.
4. The Effect of Some Parameters of Electrolysis on Apparent Density of Electrolytic Copper Powder in Galvanostatic Deposition / M. G. Pavlović [et al.] // *Materials Science Forum*. – 2000. – Vol. 352. – P. 65 – 72.
5. Коврыженко, Р. В. Моделирование оптимального регулирования температуры жидкости в технологической ванне / Р. В. Коврыженко // *Оптимізація виробничих процесів*. – 2013. – № 14. – С. 154 – 159.
6. Litovka, Yu. V. A Method for Calculating the Thickness of a Coating on a Complex-Shaped Electrode / Yu. V. Litovka, A. M. Elizarov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2003. – Vol. 37, No. 1. – P. 88 – 91.
7. Проталинский, О. М. Система оптимального управления гальванической ванной с токонепроводящим экраном / О. М. Проталинский, Ю. В. Литовка, А. А. Пашкевич // *Датчики и системы*. – 2009. – № 5. – С. 35 – 36.
8. Litovka, Yu. V. Numerical Calculation of the Electric Field in an Electroplating bath with Bipolar Electrodes / Yu. V. Litovka, V. V. Mikheev // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2006. – Vol. 40, No. 3. – P. 305 – 310.
9. Helle, H.P.E. Numerical Determination of Potential Distribution and Current Densities in Multi-Electrode Systems / H. P. E. Helle, G. H. M. Beek, J. Th. Ligtelijn // *Corrosion*. – 1981. – Vol. 37(9). – P. 522 – 530.
10. Litovka, Yu. V. Method to Determine the Potentials of Anodes in a Multianode Electroplating Bath / Yu. V. Litovka, I. A. D'yakov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 1997. – Vol. 31, No. 2. – P. 191 – 195.
11. САПР гальванических процессов / Ю. В. Литовка [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 882 – 891.
12. Соловьев, Д. С. Система оптимального управления гальванической ванной с циклическим включением анодных секций / Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка, И. В. Милованов // *Радиотехника*. – 2010. – № 12. – С. 44 – 48.

---

### Statement of the Problem of Optimal Control over Reverse Mode of Plating in Multi-Anode Bath

V. V. Konkina<sup>1</sup>, D. S. Solovev<sup>2</sup>, Yu. V. Litovka<sup>1</sup>

*Departments: “Systems of Automated Decision Support” (1); konkina-tstu@yandex.ru; “Information Systems and Data Protection” (2), TSTU*

**Keywords:** facility management; galvanic processes; multi-anode bath; optimal control; reverse mode; uneven coating.

**Abstract:** We discuss traditional approaches to reduce the non-uniformity of electroplating. An number of works that combine some of these approaches using plating multi-anode baths. Disadvantages of existing solutions do not contribute to wider application of this approach. We propose a new plating process combining reverse mode using multi-anode baths. The described mode is considered as the control object for which we detected the input, output, disturbing and control actions. We formulated the task of optimal control for the given object by the criterion of uneven distribution of the plating thickness on the surface of the product, for which we developed a mathematical model of dynamics with distributed coordinates.

## References

1. Litovka Yu.V., Romanenko A.V., Afanasev A.V. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1998, vol. 32, no. 3, pp. 266-269.
2. Zemanová M., Krivosudská M., Chovancová M., Jorík V. *Journal of Applied Electrochemistry*, September 2011, vol. 41, pp. 1077 – 1085.
3. Dini J.W., Johnson H.R. *Gold Bulletin*, March 1980, vol. 13, pp. 31-34.1.
4. Pavlović M.G., Pavlović Lj.J., Nikolić N.D., Popov K.I. *Materials Science Forum*, 2000, vol. 352, pp. 65-72.
5. Kovryzhenko R.V. *Optimizatsiya virobnichih protsesiv*, 2013, no. 14, pp. 154-159.
6. Litovka Yu.V., Elizarov A.M. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2003, vol. 37, no. 1, pp. 88-91.
7. Protalinskiy O.M., Litovka Yu.V., Pashkevich A.A. *Datchiki & Systemi*, 2009, no. 5, pp. 35-36.
8. Litovka Yu.V., Mikheev V.V. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2006, vol. 40, no. 3, pp. 305-310.
9. Helle H.P.E., Beek G.H.M., Ligtelijn J.Th. *Corrosion*, 1981, vol. 37(9), pp. 522-530.
10. Litovka Yu.V., D'yakov I.A. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1997, vol. 31, no. 2. pp. 191-195.
11. Litovka Yu.V., Kirichenko G.A., Popova M.A., Popov A.S. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 882-891.
12. Solovjev D.S., Litovka Yu.V., Milovanov I.V. *Radiotekhnika*, 2010, no. 12, pp. 44-48.

---

### **Aufgabenstellung der optimalen Steuerung vom reversiblen Regime des Auftrags der galvanischen Schutzschicht im Bad mit vielen Anoden**

**Zusammenfassung:** Es ist das traditionelle Herangehen an die Senkung der Ungleichmäßigkeit der galvanischen Schutzschichten betrachtet. Es ist die Reihe der Arbeiten, die in sich die Kombinationen solcher Herangehens unter Ausnutzung der galvanischen Bäder mit vielen Anoden kombinieren, angeführt. Die Mängel der existierenden technischen Lösungen tragen zur breiten Anwendung des beschriebenen Herangehens nicht bei. Es ist der neue technologische Prozess des Auftrags der galvanischen Schutzschichten, der in sich das reversible Regime unter Ausnutzung der Bäder mit vielen Anoden kombiniert, vorgeschlagen. Das beschriebene Regime ist wie das Objekt der Steuerung betrachtet, für das die Eingangs-, Abgabe-, Stör- und Steuerungseinwirkungen festgestellt sind. Für das Objekt ist die Aufgabe der optimalen Steuerung nach dem Kriterium der Ungleichmäßigkeit der Verteilung der Dicke der galvanischen Schutzschicht nach der Oberfläche des Erzeugnisses gestellt, für die das mathematische Modell der Dynamik mit den verteilten Koordinaten entwickelt ist.

---

### **Formulation du problème de la commande optimale du régime réversible de la mise du recouvrement galvanique dans un bain à plusieurs anodes**

**Résumé:** Sont examinées les approches traditionnelles envers la réduction de la non-uniformité des recouvrements galvaniques. Est cité un certain nombre de travaux qui combinent de pareilles approches avec l'utilisation de bains galvaniques anodes à



plusieurs anodes. Les lacunes dans les solutions techniques existantes ne contribuent pas à l'application à grande échelle des approches décrites. Est proposé un nouveau processus technologique du dépôt électrolytique qui combine le régime réversible avec l'application de bains à plusieurs anodes. Le mode décrit est examiné comme l'objet de contrôle, pour lequel sont révélés les actions d'entrée de sortie, de perturbation et de la commande. Est mis le but de la commande optimale pour l'objet selon le critère de la non-uniformité de la distribution de l'épaisseur du placage électrolytique sur la surface de l'objet. Est développé le modèle mathématique de la dynamique avec les coordonnées distribuées.

---

**Авторы:** *Конкина Виктория Викторовна* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; *Соловьев Денис Сергеевич* – ассистент кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---