

УДК 621.357:681.5

## МНОГОМЕРНАЯ СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ В ВАННЕ С МНОГОСЕКЦИОННЫМИ АНОДАМИ

А. Г. Лютов<sup>1</sup>, А. Р. Ишкулова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>lutov1@mail.ru, <sup>2</sup>aliya.ishkulova@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 21.03.2016

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена проблема получения равномерного гальванического покрытия. Проанализированы современные способы управления процессом нанесения гальванического покрытия в ваннах с многосекционными анодами. Произведено исследование влияния параметров процесса на равномерность покрытия. Осуществлен анализ и выбор методов многомерного поиска экстремума, предложена модель многомерной системы экстремального управления плотностью тока, межэлектродным расстоянием и интенсивностью перемешивания электролита в процессе осаждения покрытия и исследована эффективность предложенного способа управления.

**Ключевые слова:** гальваническое покрытие; равномерность; многосекционные аноды; экстремальное управление; методы многомерного поиска экстремума.

### ВВЕДЕНИЕ

Получение равномерного гальванического покрытия (ГП) является одной из наиболее сложно достижимых задач, так как на распределение толщины металлического слоя оказывает влияние большое количество факторов. В большей степени равномерность зависит от конструкции и форм анодов и взаимного расположения их и обрабатываемых изделий в ванне, состава, свойств и температуры электролита.

Одним из современных способов уменьшения влияния геометрических факторов на равномерность ГП является применение систем анодов, состоящих из отдельных секций одинаковых размеров. Для управления процессом осаждения ГП в многоанодной ванне с целью улучшения равномерности покрытия предложено несколько способов заключающихся:

1. В управлении током и расположением рядов анодных секций с целью примерного повторения геометрических форм катода [1];
2. В управлении током на каждой отдельной анодной секции в зависимости от удаленности ее от катода [2];
3. В управлении длительностью подачи тока на каждую отдельную секцию [3];

4. В циклическом включении анодных секций по заранее определенной программе [4];

5. В управлении режимом реверсирования тока [5].

К недостатку всех вышеуказанных способов управления можно отнести то, что в них не учитывается интенсивность перемешивания электролита, которая оказывает значительное влияние на распределение потенциала в электролизерах, соответственно и на распределение толщины покрытия, кроме этого ее необходимо учитывать при задании плотности тока.

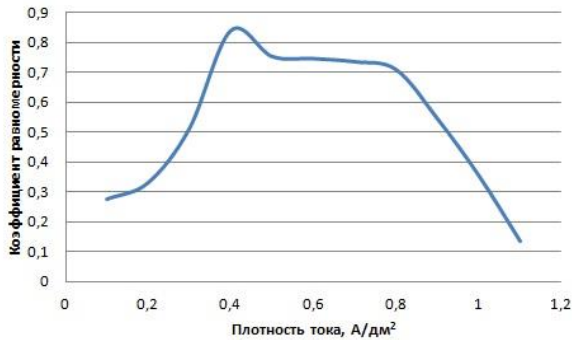
В данной работе для улучшения равномерности распределения толщины ГП предложена многомерная система экстремального управления межэлектродным расстоянием, плотностью тока и интенсивностью перемешивания электролита в процессе нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами. Задачей управления такой системы является обеспечение экстремума коэффициента равномерности ГП.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА РАВНОМЕРНОСТЬ ГП

Проведено исследование равномерности распределения толщины покрытия по поверхности катода в электролизерах с многосекционными анодами, при различных параметрах процесса,

таких как плотность тока, концентрация ионов осаждаемого металла и интенсивность перемешивания. Исследования проводились при помощи математической модели [6].

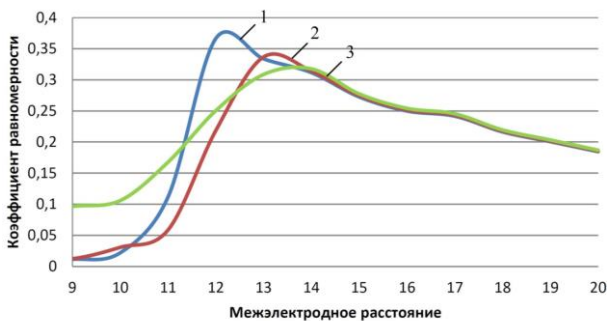
Сущность проведенных исследований заключается в установлении зависимости коэффициента равномерности:



**Рис. 1.** График зависимости коэффициента равномерности от плотностях тока



**Рис. 3.** График зависимости коэффициента равномерности от интенсивности перемешивания электролита



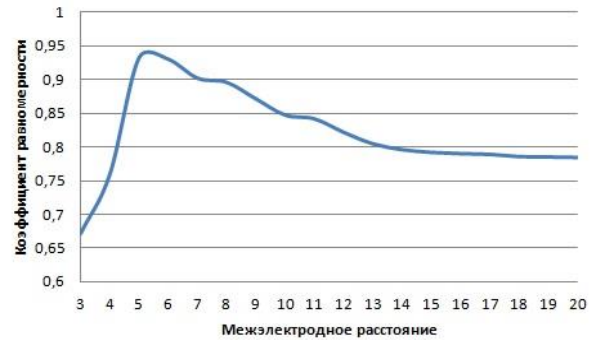
**Рис. 5.** Графики зависимости коэффициента равномерности от МЭР при различных концентрациях:

- 1 – при концентрации 10 г/л;
- 2 – при концентрации 9 г/л;
- 3 – при концентрации 8 г/л

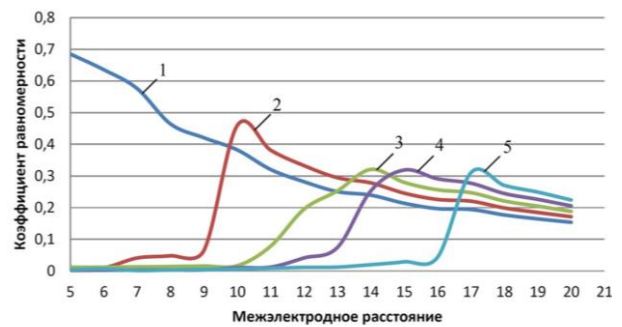
– от плотности тока и межэлектродного расстояния (рис. 1);

– от концентрации ионов осаждаемого металла и межэлектродного расстояния (рис. 2);

– от интенсивности перемешивания электролита и межэлектродного расстояния (рис. 3);

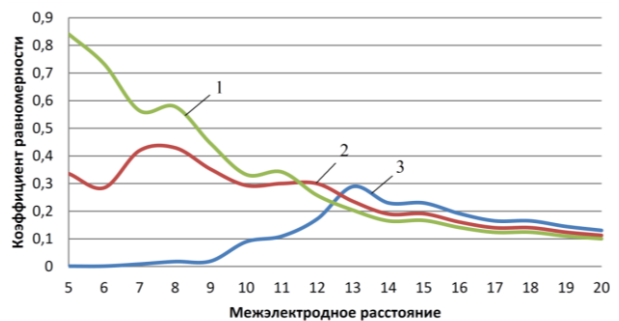


**Рис. 2.** График зависимости коэффициента равномерности от межэлектродного расстояния



**Рис. 4.** Графики зависимости коэффициента равномерности от МЭР при различных плотностях тока:

- 1 – при плотности тока 1 А/дм<sup>2</sup>;
- 2 – при плотности тока 1,5 А/дм<sup>2</sup>;
- 3 – при плотности тока 2 А/дм<sup>2</sup>;
- 4 – при плотности тока 2,5 А/дм<sup>2</sup>;
- 5 – при плотности тока 3 А/дм<sup>2</sup>



**Рис. 6.** Графики зависимости коэффициента равномерности от МЭР при различных интенсивностях перемешивания электролита:

- 1 – при интенсивности перемешивания 2 см/с;
- 2 – при интенсивности перемешивания 1 см/с;
- 3 – при интенсивности перемешивания 0,5 см/с

Таблица 1

**Сравнительная характеристика методов многомерного поиска экстремума**

Метод поиска экстремума	Увеличение значения коэффициента в точке максимума по сравнению с начальной точкой поиска	Количество точек расчета	Длительность поиска
Случайного поиска	0,1534	23	138 с.
Гаусса-Зейделя	0,1207	9	54 с.
Наискорейшего спуска	0,4403	30	180 с.
Градиентного спуска	0,5996	47	282 с.

На основании полученных графиков можно сделать вывод, что зависимость коэффициента равномерности от плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания носит экстремальный характер. Кроме того, при различных параметрах процесса электролиза наиболее равномерное покрытие получается, при различных межэлектродных расстояниях (рис. 4, 5 и 6).

Таким образом, для обеспечения наиболее равномерного распределения толщины ГП по поверхности катода необходимо обеспечить поддержание плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита в точке экстремума коэффициента равномерности.

#### **АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДА ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА ПАРАМЕТРОМ ПРОЦЕССА**

Для получения наиболее равномерного распределения толщины металлического слоя в процессе электролиза предлагается применить алгоритм многомерного поиска экстремума коэффициента равномерности.

Для поиска экстремума коэффициента равномерности были рассмотрены методы многомерного поиска экстремума. В табл. 1 представлена сравнительная характеристика методов многомерного поиска экстремума.

Исходя из полученных данных, представленных в таблице, предлагается использовать метод градиентного спуска, с помощью которого определяются значения параметров процесса, обеспечивающих наибольшее приближение коэффициента равномерности ГП к экстремальному значению. Данный метод обладает наименьшим быстродействием, но вполне может быть применим, так как скорость изменения концентрации электролита, соответственно проводимости и вязкости, в процессе осаждения покрытия не велика.

Для оценки предложенного алгоритма была разработана имитационная модель процесса осаждения ГП в среде Simulink (рис. 7), которая включает в себя блок поиска экстремума коэффициента равномерности по математической модели. Данный блок содержит в себе алгоритм многомерного поиска экстремума по методу градиентного спуска и математическую модель процесса осаждения гальванического покрытия [6]. На входы блока поиска экстремума поступает следующая информация:

- форма и размеры катода;
- параметры процесса, такие как свойства осаждаемого металла, удельная проводимость, вязкость, температура и интенсивность перемешивания электролита;
- начальные значения плотности тока и межэлектродного расстояния;
- граничные условия, которые пересчитываются на каждом расчетном шаге.

На выходе блока получаем информацию о равномерности распределения гальванического покрытия по поверхности катода, а также значения плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита в точке экстремума.

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА**

Проведено исследование эффективности предложенного алгоритма экстремального управления процессом нанесения цинкового покрытия в гальванической ванне (рис. 8), размерами 20×20×30 см, с многосекционными анодами и катодом (рис. 9). Многосекционный анод представляет собой систему из 25 анодных секций размерностью 5×5, состоящий из квадратных пластин одинакового размера 3×3 см и расстоянием между секциями 1 см.

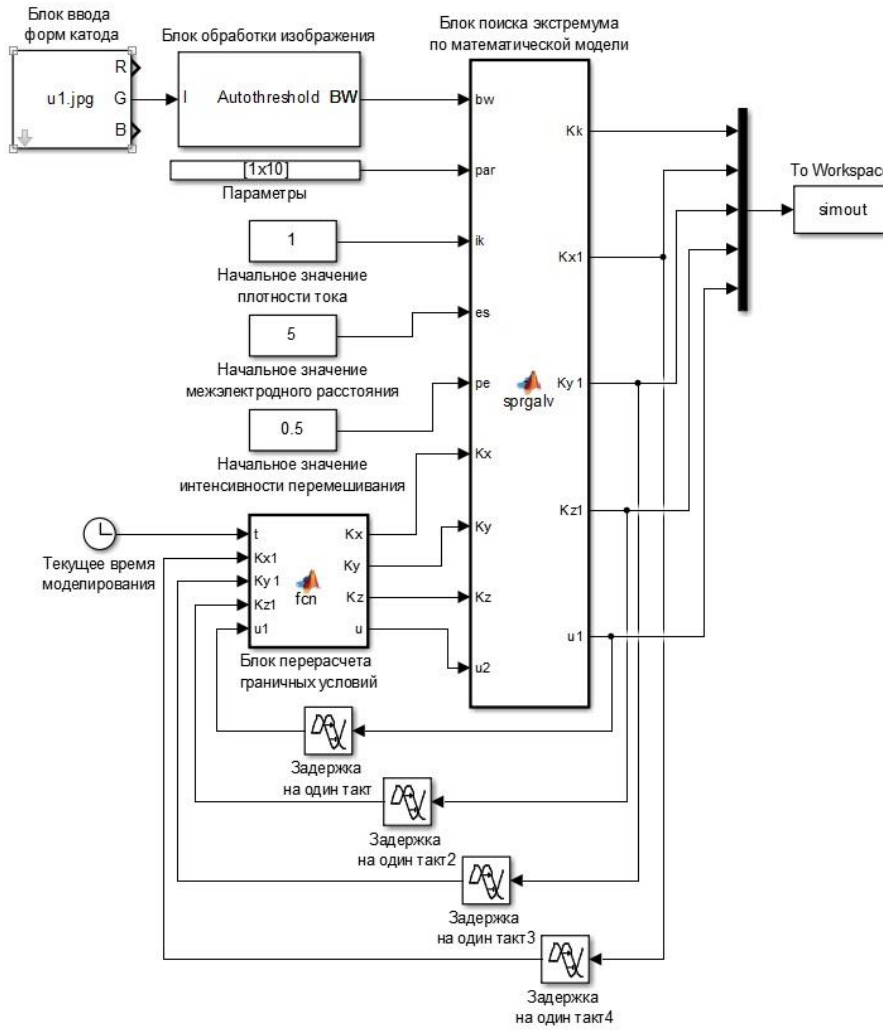


Рис. 7. Структурная схема Simulink-модели многомерной системы экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия

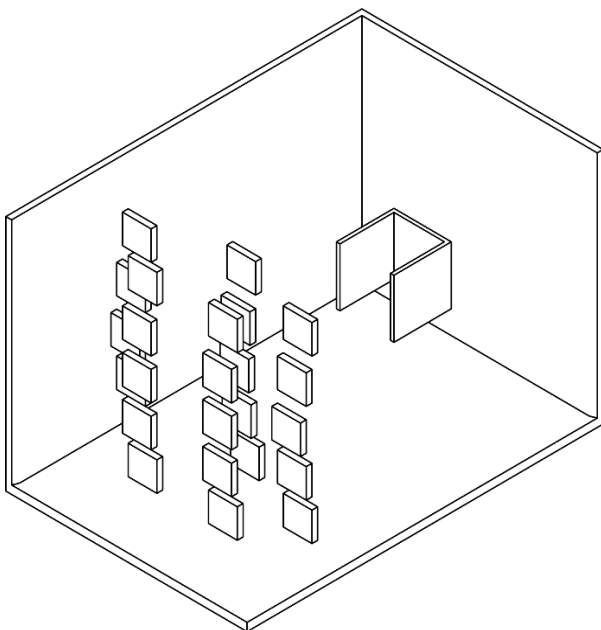


Рис. 8. Схематичное изображение гальванической ванны с многосекционными анодами

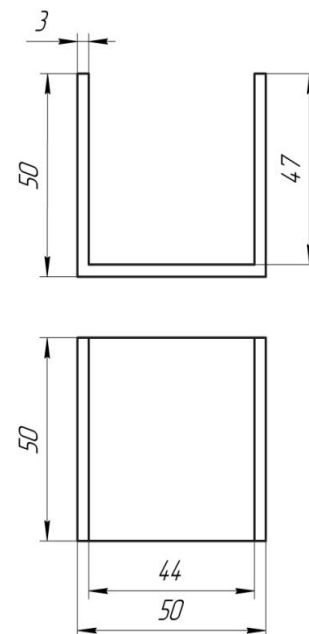


Рис. 9. Конфигурация и размеры катода

Моделирование производилось для процесса нанесения цинкового покрытия в ванны с многосекционными анодами с выровненным межэлектродным расстоянием. Расчет производился при следующих параметрах:

- состав электролита – ZnO (8-10 г/л), NaOH (140–150 г/л), экомет Ц1 (3-4 г/л), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (35-40 г/л);
- температура электролита – 17° С;
- удельная электропроводность 0,118 Ом<sup>-1</sup>×см<sup>-1</sup>
- выход по току – 100 %;
- длительность нанесения покрытия – 20 мин.

В результате моделирования (рис. 10) процесса нанесения ГП без экстремального регулирования плотностью тока, межэлектродным расстоянием и интенсивностью перемешивания электролита в ходе процесса осаждения гальванического покрытия было получено значение коэффициента равномерности равным 0,3567, с регулированием – 0,6943, т.е. практически в 2 раза.

Таким образом, применение многомерной системы экстремального управления процессом нанесения ГП с целью улучшения равномерности распределения толщины гальванического покрытия является целесообразным и эффективным.

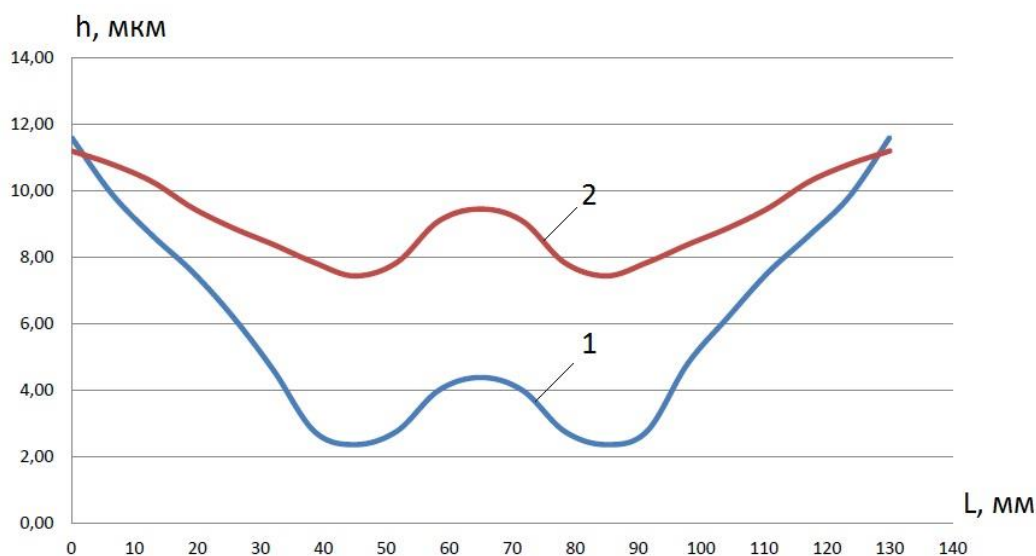


Рис. 10. Распределение толщины покрытия по поверхности катода для сечения по плоскости, полученное без регулирования (1), с регулированием (2)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что коэффициент равномерности экстремально зависит от плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания и для обеспечения наиболее равномерного распределения толщины покрытия необходимо поддерживать данные параметры в точке экстремума.

Исследования систем с экстремальным регулированием плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита и без регулирования показали, что многомерная система экстремального управления параметрами процесса осаждения ГП может значительно улучшить равномерность распределения толщины покрытия по всей поверхности, обрабатываемых изделий, и повысить качество готовой продукции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1048005 СССР, МКИЗ С 25 D 21/12. Способ автоматического управления процессами электроосаждения металла покрытия / А.Н. Алексеев и др. (СССР). № 3423910/22-02; заявл. 14.04.82; опубл. 15.10.83, бюл. № 38. [A. N. Alekseev, et al. Sposob avtomaticheskogo upravlenija processami jelektroosazhdenija metalla pokrytija [Automatic process control method of electrodeposition coating of metal]. Patent USSR, no. 3423910, 1983.]

2. А. с. 1463810 СССР, МКИ4 С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / Н.Д. Кошевой и др. (СССР). № 4316493/31-02; заявл. 31.08.87; опубл. 30.03.83, бюл. № 9. [N. D. Koshevoy et al. Ustrojstvo dlja nanesenija gal'vanicheskikh pokrytij [An apparatus for plating] Patent USSR, no. 4316493, 1983.]

3. Литовка Ю.В. Метод расчёта потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне / Ю.В. Литовка, И.А. Дьяков // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31, № 2. С. 218–221. [Y. V. Litovka, I. A. Diakov, “The method of calculating the potential of the anodes in the plating bath abounding”, (in Russian), in *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 31, no. 2. pp. 218-221, 1997.]

4. Соловьев Д. С. Оптимальное управление гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями: дис. канд. техн. наук. Тамбов: ТГТУ, 2014. 166 с. [D. S. Soloviev, *Optimal control of electroplating processes to cycle on the anode sections*, (in Russian), dis. of the cand. tech. sciences. Tambov: Tambov State Technical University “TSTU”, 2014.]

5. Конкина В. В. Математическое моделирование и оптимальное управление реверсным режимом нанесения гальванических покрытий в многоанодной ванне / Конкина В. В., Соловьев Д. С., Литовка Ю.В. // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 2. С. 7–15. [V. V. Konkina, D. S. Soloviev, Y. V. Litovka, “Mathematical modeling and optimal control of reverse plating regime mnogoanodnoy bath”, (in Russian), in *Vestnik ASTU. Ser.: Management, Computer Science and Informatics*, no. 2, pp. 7-15, 2015.]

6. Лютов А. Г. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов / А. Г. Лютов, А. Р. Ишкулова // Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2015. Т. 20, № 4. С. 45–48. [A. G. Liutov, A. R. Ishkulova, “Modeling plating process based on geometric configurations of electrodes”, (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 20, no. 4. pp. 45-48., 2015.]

## ОБ АВТОРАХ

**ЛЮТОВ Алексей Германович**, проф., зав. каф. автоматиз. технол. процессов. Дипл. инж. электронной техники (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информ. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. упр. сложн. техн. объектами.

**ИШКУЛОВА Алия Рифовна**, аспирант каф. автоматиз. технол. процессов. Дипл. инженер (УГАТУ, 2012). Готовит дисс. об автоматизации технологических процессов нанесения гальванических покрытий.

## METADATA

**Title:** Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes.

**Authors:** A. G. Lutov<sup>1</sup>, A. R. Ishkulova<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>2</sup>Aliya.Ishkulova@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 2 (72), pp. 34-39, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** In this article the problem of obtaining a uniform electroplating. Analyzed the modern process control techniques plating baths with multi-section anodes. The research on the influence of process parameters on the uniformity of the coating. The analysis and the choice of methods of multivariate extremum search, we propose a model of extreme multidimensional control system current density, distance between electrodes and electrolyte mixing intensity during the coating deposition and investigated the effectiveness of the proposed control method.

**Key words:** plating; uniformity; multisection anodes; extreme control; methods of multidimensional search of extremum

**About authors:**

**LUTOV, Alexey Germanovich**, Prof., Head. Dept. of Automated Technological Processes. Dipl. the engineer of electronic technics (UAI, 1985), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2005).

**ISHKULOVA Aliya Rifovna**, Postgrad. student. Dipl. engineer (USATU 2012).