

Труды МАИ. 2022. № 122
Trudy MAI, 2022, no. 122

Научная статья
УДК 621.357.
DOI: [10.34759/trd-2022-122-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-18)

РАСЧЁТНО-ЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКАТОДНОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ВАННОЙ

Андрей Алексеевич Банников¹, Юрий Владимирович Литовка²✉

^{1,2}Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия

¹aabannikov@yandex.ru

²polychem@list.ru✉

Аннотация. Рассмотрена расчётно-логическая интеллектуальная система оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия на множество деталей-катодов. Система управления решает задачу поиска оптимального расположения нескольких катодов различной формы и размеров в гальванической ванне, для получения покрытий с минимальной неравномерностью.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, неравномерность, деталь, катод, анод, система управления

Для цитирования: Банников А.А., Литовка Ю.В. Расчётно-логическая интеллектуальная система управления многокатодной гальванической ванной //

Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-18)

COMPUTATIONAL AND LOGICAL INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-CATHODE GALVANIC BATH

Andrey A. Bannikov¹, Yuri V. Litovka²✉

^{1,2}Tambov State Technical University,

Tambov, Russia

¹aabannikov@yandex.ru

²polychem@list.ru✉

Abstract. The most important electroplating quality indicator is the uniform distribution of the applied metal thickness the on the part surface. It is advisable to process small-size parts conjointly, since large-volume electroplating baths are being used as usual in industrial conditions. Accordingly, it is unprofitable to process one part in one operation cycle of the electroplating bath. Given that the shapes of the parts being processes may differ and the number of parts may vary, this or that parts' placing on the special suspending device may lead to various values of the total unevenness. Besides, the ineffectual placing may cause significant metal losses and excess electric energy consumption. Accordingly, the task of such multi-cathode system optimal control comes into being.

The article considers a computational-and- logical intelligent system for controlling electroplating applying on the multiplicity of the parts-cathodes. The computational-and-logical intelligent optimal control system solves the problem of searching for the optimal placing of several cathodes of various shapes and weights in an electroplating bath to obtain coatings with minimal unevenness.

To solve the set problem, the developed system employs the full search method, modified Gomori algorithm and the branches and boundaries method. The initial data for one of the three methods selecting is the number and shape of the parts to be electroplated. Afterwards, employing both database and knowledge base, the best method for the problem solving being defined, and the problem solution of optimal parts-cathodes placing on the suspension from the viewpoint of the unevenness criterion is being solved. At each stage, the technologist has the ability to control the process of the task solving and result correcting.

As the result of the optimal control system application in electroplating production, the total unevenness of the galvanic coating on the surface of many simultaneously processed parts decreases; the parts processing speed increases; the number of defects in the production process decreases, and the load on the electroplating line operator decreases. It is worth noting as well the electrical energy consumption reduction by the galvanic line when implementing a computational-and-logical intelligent system for optimal control of the galvanic coating applying process employing a variety of parts-cathode of various shapes and sizes. The proposed Gomori method modification increases the control system efficiency and reduces the amount of time required to calculate the optimal parts placing on the suspension.

Keywords: electroplating, unevenness, part, cathode, anode, system of control

For citation: Bannikov A.A., Litovka Yu.V. Computational and logical intelligent control system for a multi-cathode galvanic bath. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-18)

Введение

Нанесение гальванических покрытий – один из наиболее распространенных способов придания покрываемой поверхности деталей специальных свойств. В авиастроении гальванические покрытия широко используются для защиты и придания специальных свойств поверхностям стальных деталей. Кадмирование и цинкование применяются для защиты деталей, работающих при средних температурах (до 300°C). Эти виды покрытий являются эффективным средством предотвращения контактной коррозии при соединении деталей из разнородных металлов. Кадмирование применяют при эксплуатации техники в морском и тропическом климате. Меднение используется в качестве подслоя для нанесения других гальванических покрытий - таких, как оловянистые и никелевые. Никелирование применяется для защитно-декоративной отделки и в качестве подслоя при выполнении некоторых более сложных и термостойких (до 500°C) систем (никель - медь - никель, никель - кадмий). Для повышения износостойкости и коррозионной стойкости при повышенных температурах применяется хромирование. Серебрение и золочение используется для защиты токоподводящих контактов.

Качество гальванического покрытия очень сильно влияет на качество готовых изделий, их долговечность и эксплуатационные характеристики.

Важнейшим показателем качества гальванического покрытия является равномерность распределения толщины наносимого металла по поверхности детали [1]. Сложная форма электрического поля в гальванической ванне приводит к тому,

что даже для одинаковых плоских, симметрично расположенных в ванне анода и покрываемого катода, распределение покрытия по поверхности будет не одинаковым в различных точках. На краях и, особенно, в углах плоской детали толщина покрытия будет больше, чем в центре [1]. Существенно более сложной будет ситуация, когда покрываемая деталь будет не плоской. На выступающих в сторону анода частях детали будет наблюдаться повышенная толщина, а в отверстиях (особенно глухих) может не быть покрытия. Вопросам снижения неравномерности распределения покрытия по поверхности детали посвящено большое количество работ, в которых используются различные методы воздействия на электрическое поле: использование многоанодных ванн [2]; расчёт геометрии электрохимических ячеек [3]; размещение в ванне дополнительных катодов и биполярных электродов [4]; проведение процесса в режиме импульсного тока [5]; применение токонепроводящего перфорированного экрана [6] и др. Все известные методы ориентированы на ситуацию, когда в гальванической ванне покрывается одна деталь. Однако, детали небольшого размера целесообразно обрабатывать совместно, т.к. обычно в промышленных условиях используются гальванические ванны объёмом от 0.5 до 10 м³. Соответственно, нерентабельно обрабатывать по одной детали за один цикл работы гальванической ванны. В связи с тем, что форма обрабатываемых деталей может быть разная и количество деталей может варьироваться, то размещение множества деталей на специальном подвесочном устройстве (рис. 1) может приводить к различным значениям суммарной

неравномерности, причём при неудачном размещении могут быть существенны потери металла покрытия и перерасход электрической энергии.



Рисунок 1 - Размещение деталей на специальном подвесочном устройстве.

Целью работы является снижение суммарной неравномерности покрытия на поверхности множества деталей, обрабатываемых одновременно в гальванической ванне, за счёт оптимального размещения деталей на подвесочном устройстве.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу оптимального управления многокатодной гальванической системой. Суммарная неравномерность m штук деталей может быть оценена формулой:

$$R = \sum_{j=1}^m \int_{S_j} \frac{\delta_j(x,y,z) - \delta_j^{\min}}{\delta_j^{\min}} dS_j, \quad (1)$$

где R - критерий неравномерности; $\delta_j(x,y,z)$ – толщина покрытия в точке j -го катода с координатами (x,y,z) ; δ_j^{\min} - минимальная толщина покрытия на j -ом катоде; S_j – площадь поверхности j -го катода.

Постановка задачи оптимального размещения деталей-катодов на подвеске с точки зрения критерия неравномерности заключается в поиске расположения деталей на подвесочном устройстве, минимизирующего критерий (1). Поставленная задача относится к классу целочисленных.

Для связи критерия с варьируемыми переменными построена математическая модель на базе известных уравнений [7], включающая следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \partial_j(x, y, z) &= \frac{\mathcal{E}}{\rho} \int_0^T \eta \cdot i_{kj}(x, y, z, \tau) \partial \tau; \\ i_{kj}(x, y, z) &= \chi \cdot \text{grad} \varphi(x, y, z) | S_j; \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} &= 0; \\ \partial \varphi / \partial n | S_u &= 0; \\ \varphi + F_1(i_a) | S_a &= U; \\ \varphi + F_2(i_k) | S_j &= 0; \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\}$$

где S_a – площадь поверхности анода; \mathcal{E} – электрохимический эквивалент металла покрытия; ρ – плотность металла покрытия; T – время нанесения покрытия; η – катодный выход по току; τ – текущее время; i_k, i_a – соответственно, катодная и анодная плотности тока; χ – электропроводность электролита; $\varphi(x, y, z)$ – потенциал электрического поля; S_u – площадь поверхности изолятора; n – нормаль к поверхности изолятора; U – напряжение в ванне; $F_1[i_a]$ – функция анодной плотности тока, учитывающая поляризацию на аноде; $F_2[i_k]$ – функция катодной плотности тока, учитывающая поляризацию на катоде.

Отличием полученной математической модели от известных является использование n краевых условий на n деталях-катодах.

Решение системы уравнений полученной математической модели, в которой центральным является уравнение Лапласа, осуществлялось сочетанием методов расщепления [8, 9] и релаксации с прогонкой по строке [10 - 12].

Решение задачи

В настоящее время для решения подобных задач получила распространение разработка интеллектуальных систем [13], в том числе систем поддержки принятия решений [14 - 16].

В разработанной нами расчётно-логической интеллектуальной системе оптимального проектирования и управления многокатодной гальванической ванной для решения поставленной задачи используются метод полного перебора [17, 18], модифицированный алгоритм Гомори [19] и метод ветвей и границ [20]. Метод полного перебора даёт гарантированное оптимальное решение, но требует существенных затрат времени при большой размерности задачи. Алгоритм Гомори требует сложной системы ввода исходных данных. Модификация метода Гомори заключается в использовании метода пузырька при ранжировании свободных членов симплекс-таблицы для нахождения среди свободных членов переменной с максимальным дробным числом (рис. 2). Метод ветвей и границ не всегда приводит к оптимальному решению (такие решения называют «оптимистичные»). Таким

образом, возникает задача выбора наиболее подходящего метода решения задачи размещения.



Рисунок 2 - Блок-схема модифицированного метода Гомори

Исходными данными для выбора одного из трёх методов является количество и форма деталей, на которые необходимо нанести гальваническое покрытие. После этого, используя базу данных и базу знаний, производится определение наилучшего метода решения задачи и решение задачи оптимального размещения деталей-катодов на подвеске с точки зрения критерия суммарной неравномерности. На каждом этапе технолог имеет возможность контролировать процесс решения задачи и производить коррекцию результата.

Решение задачи осуществлялось на примере с девятью деталями различной формы и размеров, размещаемыми на трёх перекладинах подвесочного устройства по три штуки на каждой. В качестве начального приближения использовался вариант размещения деталей, полученный случайным образом. Расчёты показали, что оптимальное размещение деталей на подвесочном устройстве уменьшает критерий суммарной неравномерности на 19%. Кроме того, выявлено, что наименьшее время решения задачи получено при использовании модифицированного алгоритма Гомори.

Разработанная система управления многокатодной гальванической ванной имеет двухуровневую архитектуру. Вычислительное устройство верхнего уровня управляет процессом решения задачи поиска расположения деталей - катодов на подвесе, при котором суммарная неравномерность получаемых покрытий минимальна. Вычислительное устройство нижнего уровня управляет технологическим процессом нанесения гальванического покрытия.

В результате применения рассмотренной расчётно-логической интеллектуальной системы оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия с применением множества деталей-катодов различной формы и размеров на гальваническом производстве увеличивается скорость обработки деталей, уменьшается количество брака в процессе производства, уменьшается нагрузка на оператора гальванической линии. Удаление гальванического покрытия с неудачно размещённой детали на подвесе занимает большое количество рабочего времени оператора. Дальнейшая повторная обработка

требует не только дополнительного времени, но и затрат электроэнергии. Именно поэтому существенное снижение бракованных деталей является значительным преимуществом использования предложенной расчётно-логической системы управления. Также стоит отметить общее снижение потребления электроэнергии гальванической линией при внедрении системы. В случаях, когда возникает большая размерность задачи, предложенная модификация метода Гомори повышает эффективность работы системы управления и снижает количество времени, необходимого для расчёта оптимального расположения деталей на подвесе, по сравнению с методом перебора и методом ветвей и границ. Необходимо отметить, что предложенная система имеет базу данных, в которой хранятся все модели используемых деталей на производстве, а также имеется база знаний, в которой хранятся все ранее проведённые расчёты. Соответственно в случаях, когда новая партия деталей совпадает с ранее обработанной по количеству деталей определённого типа, то система показывает результаты расчётов, проведённые прежде. Данная возможность значительно экономит время оператора на подготовку к процессу нанесения гальванического покрытия.

Выводы

Поставлена задача поиска оптимального размещения деталей различной формы и размера на подвесочном устройстве гальванической ванны с точки зрения критерия суммарной неравномерности. Разработана расчётно-логическая интеллектуальная система, в которой используются метод полного перебора, модифицированный авторами алгоритм Гомори и метод ветвей и границ. Решение

задачи оптимизации предложенными алгоритмами позволило уменьшить критерий неравномерности на 19% по сравнению с вариантом размещения деталей случайным образом. Выявлено, что наименьшее время решения задачи получено при использовании модифицированного алгоритма Гомори.

Список источников

1. Каданер Л.И. Равномерность гальванических покрытий. - Харьков: Изд-во ХГУ, 1960. - 414 с.
2. Литовка Ю.В., Соловьев Д.С., Мукина И.А. Особенности оптимального управления гальваническими процессами в многоанодной ванне с различными значениями силы тока // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 9. С. 631-636. URL: <https://doi.org/10.17587/mau.18.631-636>
3. Lavelaine de Maubeuge, H. Calculation of the Optimal Geometry of Electrochemical Cells: Application to the Plating on Curved Electrodes // Journal Electrochemical Society, 2002, vol. 149(8), pp. 413-422. DOI:[10.1149/1.1487835](https://doi.org/10.1149/1.1487835)
4. Литовка Ю.В., Као В.З., Соловьёв Д.С. Оптимальное управление технологическим процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 8. С. 547-552.
5. Zemanová M., Krivosudská M., Chovancová M., Jorík V. Pulse current electrodeposition and corrosion properties of Ni–W alloy coatings // Journal of Applied Electrochemistry, 2011, vol. 41(9), pp. 1077 – 1085. DOI:[10.1007/s10800-011-0331-y](https://doi.org/10.1007/s10800-011-0331-y)

6. Пчелинцева И.Ю., Литовка Ю.В. Математическая модель и численная схема расчёта электрических полей в гальванических ваннах с плоским токонепроводящим экраном // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2021. № 3. С. 85-97.
7. Гнусин Н.П., Поддубный Н.П., Маслий А.И. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах. - Новосибирск: Наука, 1972. - 276 с.
8. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. - М.: Наука, 1989. - 608 с.
9. Марчук Г.И. Методы расщепления. - М.: Наука, 1988. - 274 с.
10. На Цунг Йен. Вычислительные методы решения прикладных граничных задач. - М.: Мир, 1982. - 296 с.
11. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. - М.: Наука, 1978. - 591 с.
12. Liu C., Kubacki G.W., Kelly R.G. Application of Laplace equation-based modeling into corrosion damage prediction for galvanic coupling between a zinc plate and stainless steel rods under a thin film electrolyte // Corrosion, 2019, vol. 75, iss. 5, pp. 465-473. DOI: [10.5006/2969](https://doi.org/10.5006/2969).
13. Литовка Ю.В., Соловьев Д.С., Соловьёва И.А., Коробова И.Л. Модификация метода анализа иерархий для повышения объективности принимаемых решений // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90475>

14. Дорожко И.В., Иванов О.А. Модель системы поддержки принятия решений для диагностирования бортовых систем космического аппарата на основе байесовских сетей // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158259>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-19)
15. Привалов А.Е., Дорожко И.В., Захарова Е.А., Копейка А.Л. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=101526>
16. Голомазов А.В. Метод информационной поддержки принятия решений, реализуемый в среде мультиагентной системы // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105738>
17. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. - М.: Химия, 1975. - 576 с.
18. Ашурков И.С., Лешко Н.А., Какаев В.В. Использование метода прямого перебора для оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69752>
19. Литовка Ю.В., Банников А.А. Система управления многокатодной гальванической ванной // XXIX Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления автоматике и обработки информации»: сборник трудов (Алушта, 14 – 20 сентября 2020). – СПб.: ГУАП, С. 42.

20. Карандеев Д.Ю., Голубничий А.А. Реализация метода ветвей и границ в статистической среде R // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 6. С. 109.

References

1. Kadaner L.I. *Ravnomernost' gal'vanicheskikh pokrytii* (Uniformity of electroplating coatings), Khar'kov, Izd-vo KhGU, 1960, 414 p.
2. Litovka Yu.V., Solov'ev D.S., Mukina I.A. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 631-636. URL: <https://doi.org/10.17587/mau.18.631-636>
3. Lavelaine de Maubeuge H. Calculation of the Optimal Geometry of Electrochemical Cells: Application to the Plating on Curved Electrodes, *Journal Electrochemical Society*, 2002, vol. 149 (8), pp. 413-422. DOI:[10.1149/1.1487835](https://doi.org/10.1149/1.1487835)
4. Litovka Yu.V., Kao V.Z., Solov'ev D.S. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 8, pp. 547-552.
5. Zemanová M., Krivosudská M., Chovancová M., Jorík V. Pulse current electrodeposition and corrosion properties of Ni–W alloy coatings, *Journal of Applied Electrochemistry*, 2011, vol. 41(9), pp. 1077 – 1085. DOI:[10.1007/s10800-011-0331-y](https://doi.org/10.1007/s10800-011-0331-y)
6. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. *Differentsial'nye uravneniya i protsessy upravleniya*, 2021, no. 3, pp. 85-97.
7. Gnusin N.P., Poddubnyi N.P., Maslii A.I. *Osnovy teorii rascheta i modelirovaniya elektricheskikh polei v elektrolitakh* (Fundamentals of the theory of calculation and modeling of electric fields in electrolytes), Novosibirsk, Nauka, 1972, 276 p.

8. Marchuk G.I. *Metody vychislitel'noi matematiki* (Methods of computational mathematics), Moscow, Nauka, 1989, 608 p.
9. Marchuk G.I. *Metody rasshchepeniya* (Splitting methods), Moscow, Nauka, 1988, 274 p.
10. Na Tsung Ien. *Vychislitel'nye metody resheniya prikladnykh granichnykh zadach* (Computational methods for solving applied boundary value problems), Moscow, Mir, 1982, 296 p.
11. Samarskii A.A., Nikolaev E.S. *Metody resheniya setochnykh uravnenii* (Methods of solving grid equations), Moscow, Nauka, 1978, 591 p.
12. Liu C., Kubacki G.W., Kelly R.G. Application of Laplace equation-based modeling into corrosion damage prediction for galvanic coupling between a zinc plate and stainless steel rods under a thin film electrolyte, *Corrosion*, 2019, vol. 75, iss. 5, pp. 465-473. DOI: [10.5006/2969](https://doi.org/10.5006/2969)
13. Litovka Yu.V., Solov'ev D.S., Solov'eva I.A., Korobova I.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90475>
14. Dorozhko I.V., Ivanov O.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158259>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-19)
15. Privalov A.E., Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Kopeika A.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=101526>
16. Golomazov A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105738>

17. Boyarinov A.I., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii v khimicheskoi tekhnologii* (Optimization methods in chemical technology), Moscow, Khimiya, 1975, 576 p.
18. Ashurkov I.S., Leshko N.A., Kakaev V.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69752>
19. Litovka Yu.V., Bannikov A.A. *XXIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya avtomatiki i obrabotki informatsii»: sbornik trudov*, Saint Petersburg, GUAP, pp. 42.
20. Karandeev D.Yu., Golubnichii A.A. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 109.

Статья поступила в редакцию 15.11.2021; одобрена после рецензирования 07.12.2021; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 15.11.2021; approved after reviewing on 07.12.2021; accepted for publication on 21.02.2022.