

# Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья  
УДК 519.7:621.357.7  
DOI: 10.14529/ctcr240303

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ И РОЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

А.Г. Лютов<sup>1</sup>, [lutov1@mail.ru](mailto:lutov1@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

А.Р. Ишкулова<sup>2</sup>, [Aliya.Ishkulova@yandex.ru](mailto:Aliya.Ishkulova@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0005-4672-4025>

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Аннотация.** Одним из ключевых параметров качества гальванических покрытий является его толщина, которая должна соответствовать техническим требованиям и обеспечивать необходимую степень защиты от коррозии, износостойкость и внешний вид покрытия. Обеспечение равномерности гальванического покрытия является одной из важных и сложных задач высокотехнологичного машиностроительного производства, для решения которой предложен ряд методов, таких как управление токовыми режимами, расположением электродов в ванне, скоростью потока электролита. Однако в большинстве случаев эти методы требуют решения задачи оптимального многопараметрического управления. Оперативная и точная оптимизация при изменении условий электролиза (электродных потенциалов, состава и свойств электролита), а также при необходимости учета многоэкстремального характера зависимости коэффициента равномерности от параметров процесса (плотности тока, межэлектродного расстояния, скорости потока электролита) является достаточно сложной и неоднозначной многофакторной задачей, ограничивающей применение классических методов для поиска глобального экстремума. В статье исследуется возможность и целесообразность использования интеллектуальных эвристических методов, таких как эволюционные и роевые, для решения данной задачи. **Цель.** Целью данного исследования является определение эффективности применения генетических алгоритмов и метода роя частиц для решения задачи оптимизации многопараметрического управления процессом нанесения гальванических покрытий. **Материалы и методы.** Для проведения исследования были использованы методы математического моделирования, методы и программные среды численного моделирования и оптимизации. **Результаты.** В статье произведены исследования эффективности применения эволюционных и роевых методов оптимизации применительно к процессу нанесения хромового покрытия в гальванической ванне с многими анодами при многопараметрическом управлении плотностью тока, межэлектродным расстоянием и скоростью потока электролита. Наилучшего приближения к экстремуму коэффициента равномерности позволяют достигнуть генетические алгоритмы с использованием операции мутации и метода роя частиц, при этом достижение экстремума с применением метода роя частиц достигается за меньшее количество итераций. **Заключение.** Результаты исследования обосновывают целесообразность применения эволюционных и роевых методов решения задачи оптимизации многопараметрического управления процессом нанесения гальванических покрытий, при этом можно добиться повышения эффективности данных методов за счет дополнительной настройки.

**Ключевые слова:** оптимизация, многопараметрическое управление, гальваническое покрытие, генетический алгоритм, метод роя частиц

**Для цитирования:** Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Применение эволюционных и роевых методов для оптимизации многопараметрического управления процессом нанесения гальванического покрытия // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 29–39. DOI: 10.14529/ctcr240303

## APPLICATION OF EVOLUTIONARY AND SWARM METHODS TO OPTIMIZE THE MULTIPARAMETRIC CONTROL OF THE ELECTROPLATING PROCESS

A.G. Lyutov<sup>1</sup>, [lyutov1@mail.ru](mailto:lyutov1@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

A.R. Ishkulova<sup>2</sup>, [Aliya.Ishkulova@yandex.ru](mailto:Aliya.Ishkulova@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0005-4672-4025>

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Abstract.** One of the key parameters of the quality of ceramic coatings is its thickness, which must meet technical requirements and provide the necessary degree of corrosion protection, wear resistance and appearance of the coating. Ensuring the uniformity of the galvanic coating is one of the most important and complex tasks of high-tech machine-building production, for which a number of methods have been proposed, such as controlling current modes, the location of electrodes in the bath, and the electrolyte flow rate. However, in most cases, these methods require solving the problem of optimal multiparametric control. Prompt and accurate optimization when changing the conditions of electrolysis (electrode potentials, composition and properties of the electrolyte), as well as, if necessary, taking into account the multi-extreme nature of the dependence of the uniformity coefficient on the process parameters (current density, interelectrode distance, electrolyte flow rate) is a rather complex and ambiguous multifactorial task that limits the use of classical methods for the claim of a global extreme. The article explores the possibility and expediency of using intelligent heuristic methods, such as evolutionary and swarm methods, to solve this problem. **Objective.** The objective of this study is to determine the effectiveness of using genetic algorithms and the particle swarm method to solve the problem of optimizing the multiparametric control of the electroplating process. **Materials and methods.** Methods of mathematical modeling, methods and software environment of numerical modeling and optimization were used to conduct the study. **Results.** The article investigates the effectiveness of the application of evolutionary and swarm optimization methods in relation to the process of applying chrome plating in a galvanic bath with many anodes with multiparametric control of current density, interelectrode distance and electrolyte flow rate. The best approximation to the extreme of the uniformity coefficient can be achieved by genetic algorithms using the mutation operation and the particle swarm method, while achieving the extreme using the particle swarm method is achieved in fewer iterations. **Conclusion.** The results of the study substantiate the expediency of using evolutionary and swarm methods to solve the problem of optimizing the multiparametric control of the electroplating process, while it is possible to increase the efficiency of these methods due to additional tuning.

**Keywords:** optimization, multiparametric control, electroplating, genetic algorithm, particle swarm method

**For citation:** Lyutov A.G., Ishkulova A.R. Application of evolutionary and swarm methods to optimize the multiparametric control of the electroplating process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):29–39. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240303

### Введение

Гальванические покрытия (ГП) широко используются в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая коррозионная стойкость, износостойкость и привлекательный внешний вид. Однако процесс нанесения ГП является сложным и требует оптимизации для достижения равномерности и качества.

К качеству ГП предъявляют высокие требования. Покрытия должны обладать требуемой микротвердостью, шероховатостью, равномерностью, прочностью сцепления с поверхностью изделия и декоративными свойствами (глянцевое, матовое, цвет покрытия).

Равномерность покрытия является одним из ключевых параметров, определяющих качество и эффективность процесса нанесения ГП. Равномерное покрытие обеспечивает равномерное распределение металла на поверхности детали, что приводит к улучшению коррозионной стойкости, износостойкости и внешнего вида изделия. Кроме того, равномерность покрытия влияет на рав-

номерность электрохимического потенциала, что, в свою очередь, определяет эффективность процесса нанесения ГП.

В процессе нанесения ГП производят регулирование технологических параметров, таких как плотность тока, расположение электродов в ванне, скорость потока электролита, температура, значения которых непосредственно сказываются на равномерности распределения толщины покрытия.

### 1. Постановка задачи

С целью улучшения равномерности распределения толщины ГП на сегодняшний день предложено множество методов, которые можно объединить в следующие группы:

- регулирование тока и режимов его подачи [1–5];
- выбор оптимального размещения электродов в ванне [6–9];
- совместное регулирование плотностью тока, расположением электродов и скоростью потока электролита [10, 11].

Вышеуказанные методы управления процессом нанесения ГП для получения наилучшего результата по критерию равномерности требуют решения задачи определения оптимального многопараметрического управления, которое осуществляется с использованием математической модели процесса осаждения ГП. Пример одной из таких моделей приведен в работе [12]. При этом задача оптимизации управления сводится к максимизации коэффициента равномерности покрытия  $K_p$  за счет регулирования плотности тока  $i$ , межэлектродного расстояния  $l$  и интенсивности перемешивания электролита  $u$  в процессе осаждения ГП:

$$K_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{h_{\min}(t)}{h_i(x, y, z, t)} \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях на допустимые значения

$$h_{\min} > h_{\text{зад}}, \quad i_{\min} < i < i_{\max}, \quad l_{\min} < l < l_{\max}, \quad u_{\min} < u < u_{\max}. \quad (2)$$

В выражении (1):  $h_{\min}$  – минимальная толщина покрытия;  $h_i$  – толщина покрытия в точке  $(x, y, z)$  поверхности катода;  $n$  – количество точек определения толщины покрытия на поверхности изделия.

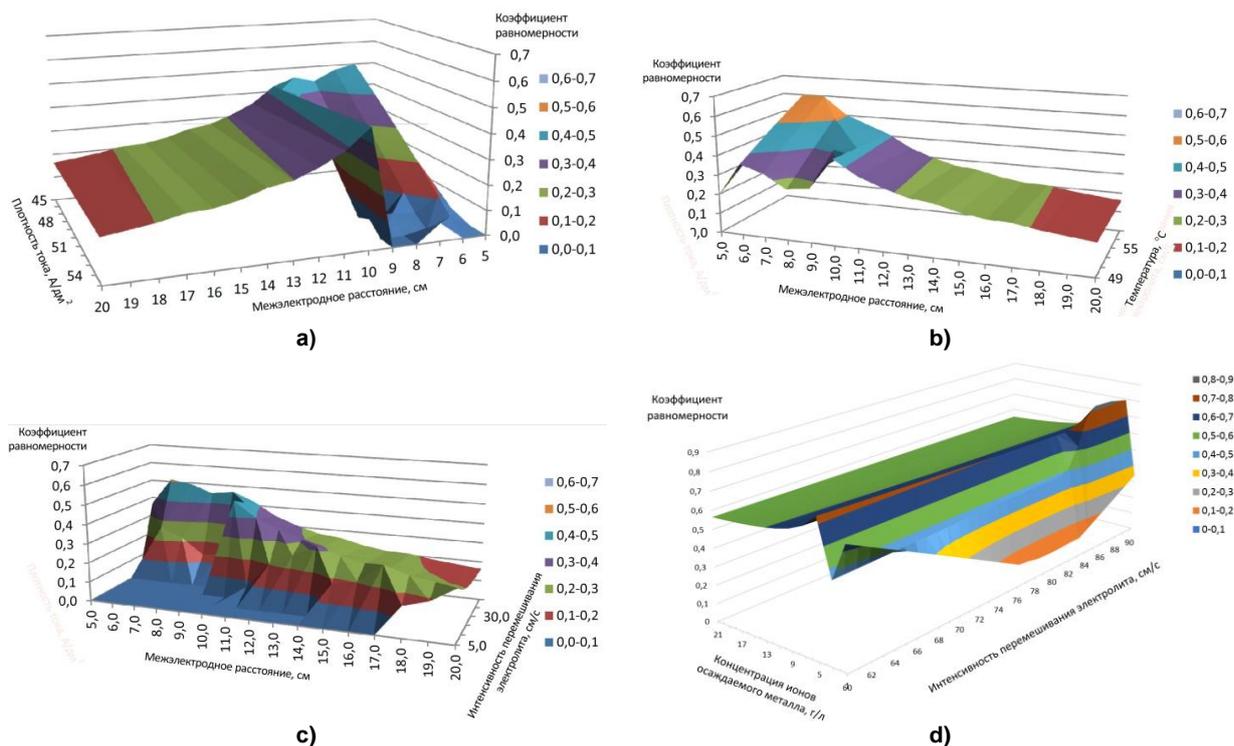
Часть процессов управления нанесением ГП связана со статическими (квазистатическими) режимами, при которых определение оптимальных режимных параметров осуществляется априори (перед началом процесса) и не требует часто повторяющихся быстродействующих оптимизационных процедур в ходе процесса.

Другая часть процессов управления (регулирования) связана с динамическими режимами, обусловленными в основном различного рода перемещениями и переключениями электродов, изменениями режимов подачи тока в ходе процесса и т. д. В этом случае происходит изменение условий оптимизации (режимных параметров, структуры и параметров математической модели, ограничений), что обуславливает необходимость оперативного (согласованного с темпом динамических режимов) определения значения регулируемых параметров, при которых будет поддерживаться экстремум целевого критерия в изменяющихся условиях осаждения покрытия. Очевидно, что здесь требуется достаточное быстродействие используемых методов поиска экстремума.

В обоих случаях необходима высокая точность приближения к экстремуму, так как это определяет наряду с быстродействием точность поддержания оптимальных режимов нанесения ГП как в статических, так и в динамических режимах.

При этом необходимо отметить, что решение оптимизационных задач для каждого метода имеет ряд сложностей, связанных с многоэкстремальным и овражным характером зависимости значения целевой функции – равномерности распределения толщины покрытия от технологических параметров [13], а также от условий осаждения покрытий вследствие изменения таких параметров, как концентрация электролита, его проводимости, потенциалов электродов, толщины диффузионного слоя ионов осаждаемого металла у поверхности катода.

В качестве примера на рис. 1 приведены трехмерные зависимости равномерности покрытия (полученные с использованием упомянутой выше модели процесса нанесения ГП [12]) от плотности тока, межэлектродного расстояния, интенсивности перемешивания, температуры и концентрации ионов осаждаемого металла в электролите.



**Рис. 1.** Зависимость равномерности покрытия от плотности тока и межэлектродного расстояния (а), температуры электролита и межэлектродного расстояния (б), интенсивности перемешивания электролита и межэлектродного расстояния (с), интенсивности перемешивания электролита и концентрации ионов осаждаемого металла (д)

**Fig. 1.** The dependence of the uniformity of the coating on the current density and the interelectrode distance (a), the temperature of the electrolyte and the interelectrode distance (b), the intensity of mixing of the electrolyte and the interelectrode distance (c), the intensity of electrolyte mixing and the concentration of ions of the deposited metal (d)

Очевидно, что увеличение числа одновременно регулируемых параметров процесса, расширяющих пространство поиска, многократно усиливает упомянутые выше трудности решения оптимизационной задачи.

Таким образом, требуется решить задачу быстродействующей, точной многопараметрической оптимизации управления нанесением ГП в условиях многоэкстремального характера многомерной поверхности поиска.

Использование классических методов поиска экстремума (полного перебора, покоординатного, наискорейшего и градиентного спуска и т. д.) приводит к значительному числу расчетов, большой вероятности попадания в локальный экстремум, снижению быстродействия из-за овражных ситуаций, невысокой точности приближения к точке экстремума, существенной зависимости от точки начального приближения [13].

Поскольку задачу оптимального управления ГП ввиду ее многопараметрического и многоэкстремального характера, требуемого быстродействия при изменении условий оптимизации, можно отнести к классу сложных задач, то данные обстоятельства требуют выбора более подходящих современных методов поиска экстремума.

Одним из эффективных подходов является использование методов, основанных на технологиях искусственного интеллекта, в частности эвристических методов глобального поиска, таких как эволюционные (генетические) алгоритмы и метод роя частиц.

## 2. Генетические алгоритмы

Генетические алгоритмы (ГА) основаны на принципах естественного отбора и эволюции. Они представляют собой итерационный процесс, в котором популяция возможных решений (особей) подвергается процессу отбора, скрещивания и мутации.

Отбор особей осуществляется на основе их приспособленности – функции, которая определяет, насколько хорошо особь решает поставленную задачу. Скрещивание особей приводит

к образованию новых решений, которые наследуют лучшие качества своих родителей. Мутация позволяет внести разнообразие в популяцию и избежать застоя в процессе поиска оптимального решения. Основные этапы поиска экстремума с использованием ГА представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные этапы поиска экстремума с использованием ГА**  
**The main stages of the extremum search using genetic algorithms**

Table 1

№	Этап	Содержание этапа
1	Определение задачи	Формулировка задачи оптимизации с определением целевой функции и ограничений
2	Генерация начальной популяции	Создание начальной популяции хромосом, представляющих возможные решения
3	Оценка хромосом	Оценка приспособленности каждой хромосомы на основе целевой функции
4	Скрещивание хромосом	Пара хромосом выбирается случайным образом и скрещивается, чтобы создать две новые. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет создано определенное количество новых хромосом
5	Мутация хромосом	Случайная мутация некоторых хромосом с целью внесения разнообразия в популяцию
6	Отбор хромосом	Хромосомы с высокой приспособленностью имеют больше шансов быть выбранными для скрещивания и передачи своих генов следующим поколениям
7	Проверка на достижение оптимального решения	Если оптимальное решение найдено, алгоритм останавливается. В противном случае выполняется переход к этапу генерации нового поколения
8	Обновление популяции	Хромосомы, выбранные для скрещивания, формируют новое поколение. Невыбранные также переходят в данное поколение с некоторыми модификациями
9	Повторение этапов 3–8	До достижения заданного числа поколений или оптимального решения

В частности, хромосомы  $v_i$  могут быть представлены в виде строки битов. Кодирование в бинарной строке оптимизируемых параметров производится предварительным определением требуемого числа битов  $j$  для каждого параметра и находится по следующей формуле [14]:

$$2^{j-1} < (x_{\max} - x_{\min}) \cdot 10^{n_x} \leq 2^j - 1, \tag{3}$$

где  $x_{\min}, x_{\max}$  – минимальное и максимальное значение оптимизируемого параметра;  $n_x$  – длина хромосомы параметра  $x$ . Обратное преобразование закодированных параметров производится по формуле

$$x_i = x_{\min} + v_i \cdot \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^j - 1}. \tag{4}$$

ГА обладают следующими преимуществами:

- универсальность: могут решать широкий круг задач оптимизации;
- эффективность: в отличие от других методов, не требуют знания производных целевой функции, что делает их более гибкими;
- эвристическая природа: позволяет им находить хорошие решения за относительно короткое время.

В то же время ГА обладают рядом недостатков:

- требовательность к вычислительным ресурсам: из-за большого числа итераций и возможных комбинаций при поиске решений;
- невозможность полностью гарантировать нахождение оптимального решения: как и другие методы оптимизации, ГА могут не находить оптимальное решение в некоторых случаях;

– сложность настройки: такие параметры, как размер популяции, вероятность мутации и скрещивания, должны быть настроены для каждой задачи, что может потребовать значительных ресурсов.

### 3. Роевой метод

Метод роя частиц (МРЧ) основан на имитации поведения социальных животных, таких как птицы или рыбы. В этом методе каждая частица (решение) имеет свою позицию и скорость, которые изменяются в процессе взаимодействия с другими частицами роя.

Каждая частица стремится к наилучшему решению, которое она знает (глобальный оптимум), и к своему наилучшему решению (личный оптимум). Таким образом, частицы обмениваются информацией о своих позициях, и весь рой координированно перемещается в направлении областей с лучшими решениями. Основные этапы поиска оптимального решения методом МРЧ представлены в табл. 2 [15].

Основные этапы поиска оптимального решения методом МРЧ

Таблица 2

Table 2

The main stages of the search for the optimal solution by the particle swarm method

№	Этап	Содержание этапа
1	Генерация начальных позиций частиц	Каждой частице присваивается случайная позиция в пространстве поиска
2	Обновление позиций частиц	Для каждой частицы обновляется ее позиция на основе ее скорости и информации о лучшей найденной позиции
3	Проверка на нахождение глобального оптимума	Если частица нашла лучшее решение, то она запоминает его как глобальное оптимальное решение
4	Обновление скоростей частиц	Каждая частица обновляет свою скорость на основе информации о лучшем найденном решении и лучших решениях, найденных другими частицами
5	Обновление позиций частиц	С учетом новых скоростей
6	Проверка окончания работы алгоритма	Если выполнено определенное количество итераций или если все частицы находятся в окрестности глобального оптимального решения, то алгоритм останавливается и возвращает найденное оптимальное решение. Иначе возврат к шагу 2

Новая позиция частицы определяется в соответствии со сведениями о найденных оптимумах и вычисляется по формуле

$$v_{i,j} = v_{i,j} + a_1 \cdot rand(0,1) \cdot (P_{best_i} - x_{i,j}) + a_2 \cdot rand(0,1) \cdot (G_{best_i} - x_{i,j}), \quad (5)$$

где  $v_{i,j}$  – вектор скорости  $i$ -й частицы по  $j$ -й координате;  $a_1, a_2$  – постоянные ускорения;  $P_{best_i}$  – лучшая найденная частицей точка;  $G_{best_i}$  – лучшая точка, найденная всеми частицами системы;  $x_{i,j}$  – текущее положение  $i$ -й частицы по  $j$ -й координате;  $rand(0,1)$  – функция, возвращающая случайное число от 0 до 1.

Основным преимуществом МРЧ является его простота и эффективность. Он не требует вычисления производных целевой функции и может работать с функциями любой сложности. Кроме того, МРЧ обладает хорошей сходимостью к глобальному оптимуму и может быть легко распараллелен.

К недостаткам МРЧ можно отнести следующее. Во-первых, метод может быть чувствителен к выбору начальных параметров, таких как количество частиц, скорость обучения и т. д. Во-вторых, МРЧ может страдать от проблемы «сцепления», когда частицы «прилипают» к локальным оптимумам и не могут их покинуть. В-третьих, метод требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при работе с большими размерностями пространства поиска.

#### 4. Сравнительная характеристика методов

Хотя ГА и МРЧ имеют разные механизмы поиска решений, они имеют и общие черты. Так, оба метода являются стохастическими, то есть они используют случайность для выбора особей или частиц, что позволяет находить различные варианты решений. Однако ГА больше подходит для решения задач с дискретным пространством поиска, так как он использует скрещивание особей. МРЧ же лучше подходит для задач с непрерывным пространством, поскольку он позволяет частицам перемещаться в любых направлениях и на любые расстояния.

Для обоих методов требуется настройка параметров для оптимальной работы. ГА требуются параметры, такие как вероятность скрещивания, мутации, размер популяции и другие. МРЧ требует настройки параметров скорости обучения, количества частиц и других.

Если нужна высокая точность и нахождение глобального оптимума, то генетические алгоритмы ГА могут быть лучшим выбором, а если требуется быстрое решение простой задачи, то МРЧ будет предпочтительнее.

Таким образом, эвристические алгоритмы, такие как ГА и МРЧ, являются одним из эффективных подходов к оптимизации сложных систем и процессов. Однако выбор между ГА и МРЧ зависит от характеристик решаемой задачи и требуемого результата.

В контексте оптимизации процесса нанесения ГП эвристические алгоритмы могут показать высокую эффективность поиска оптимальных параметров процесса, которые обеспечивают наилучшую равномерность покрытия.

#### 5. Пример численной оптимизации

Применение ГА и МРЧ рассмотрим на примере оптимизации процесса хромирования стальной детали в многоанодной ванне, представленной на рис. 2.

Расчет производился при помощи математической модели, представленной в работе [12], при следующих параметрах электролиза: состав электролита –  $\text{CrO}_3$  (250 г/л),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (25 г/л); температура электролита –  $55^\circ\text{C}$ ; удельная электропроводность –  $0,0166 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ .

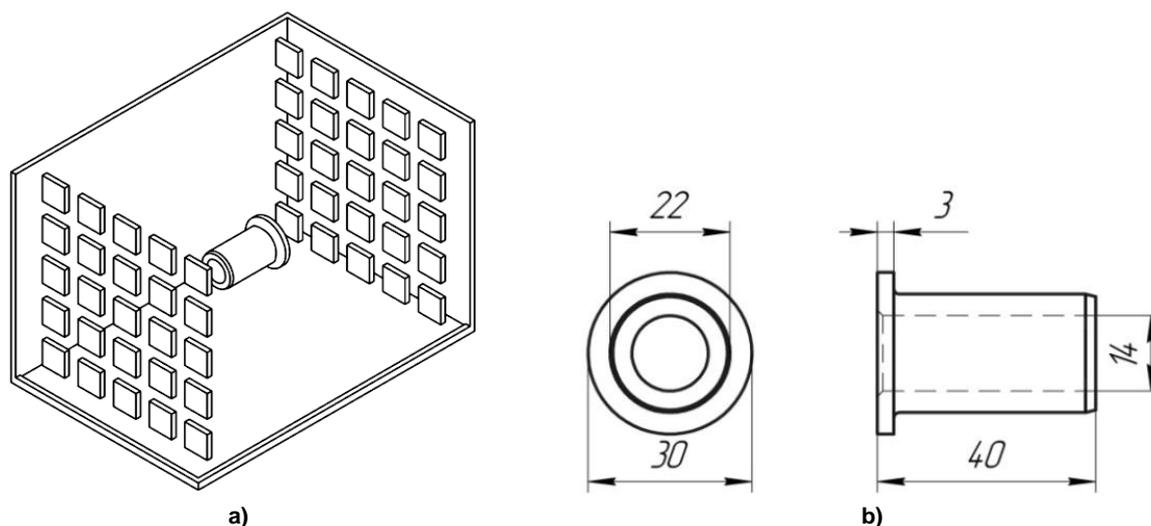


Рис. 2. Схематичное изображение гальванической ванны (а), геометрическая конфигурация и размеры катода (б)

Fig. 2. Schematic representation of the galvanic bath (a), geometric configuration and dimensions of the cathode (b)

Поиск оптимума производился в следующих диапазонах изменения значений параметров процесса: плотность тока –  $45\text{--}55 \text{ А/дм}^2$ ; межэлектродное расстояние –  $5\text{--}20 \text{ см.}$ ; интенсивность перемешивания электролита –  $0,5\text{--}50 \text{ см/с.}$

Сравнение эффективности применения ГА и МРЧ для решения задачи оптимального управления процесса хромирования проводилось при размере начального набора решений, равном 15 для каждого метода.

ГА рассматривались в трех разных вариациях с использованием операций скрещивания, мутации и совместном применении обеих операций. Мутации хромосом решений производились с коэффициентом  $K_M$ , равным двум.

Эффективность каждого метода, безусловно, зависит от случайно сформированного начального набора решений, в связи с чем для получения наиболее объективных результатов и последующей оценки эффективности методов исследования проводились с одинаково заданным начальным набором решений.

Результаты поиска оптимума и количество итераций, потребовавшихся на поиск с использованием ГА и МРЧ, представлены в табл. 3.

Сравнительная характеристика методов оптимизации  
Comparative characteristics of optimization methods

Таблица 3

Table 3

Метод поиска оптимума	Значение коэффициента равномерности	Количество итераций, потребовавшееся на поиск
ГА с использованием операции скрещивания	0,3506	4
ГА с использованием операции мутации	0,8361	10
ГА с использованием операций скрещивания и мутации	0,6711	5
МРЧ	0,8163	5

Как видно из приведенных в табл. 3 результатов исследования, наибольшее приближение к точке максимума коэффициента равномерности обеспечивается с использованием ГА, при этом МРЧ показал результат всего на 2,37 % ниже, что несущественно, учитывая количество точек расчета, которое потребовалось МРЧ для получения результата. Методу роя частиц потребовалось в два раза меньше количества итераций для определения экстремума.

Распределение точек поиска для каждого из рассмотренных методов (ГА с использованием операции скрещивания (а), с использованием операции мутации (б), с использованием операций скрещивания и мутации (с), метод роя частиц (д)) представлено на рис. 3.

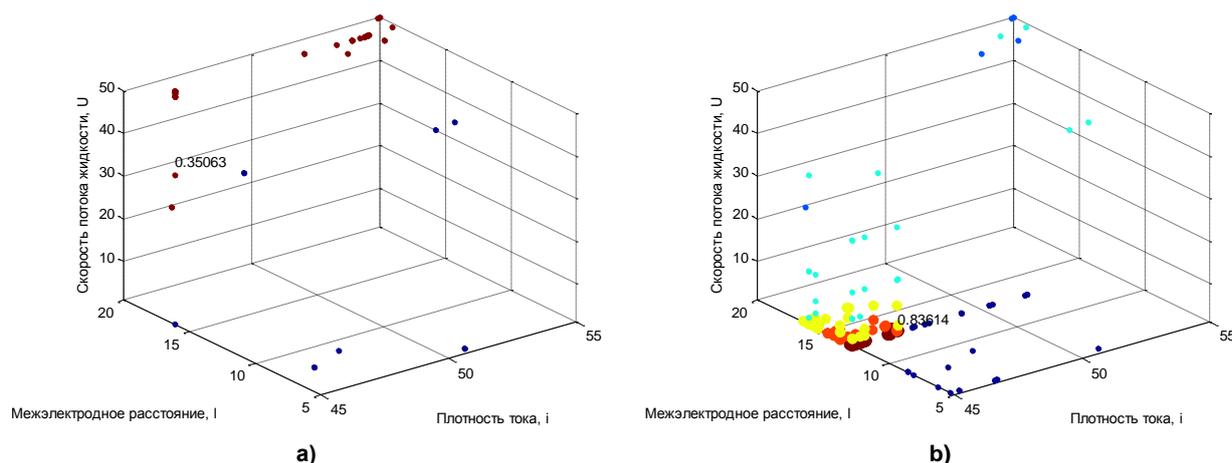


Рис. 3. Распределение точек поиска для ГА с использованием операции скрещивания (а), с использованием операции мутации (б), с использованием операций скрещивания и мутации (с), метод роя частиц (д) (см. также с. 37)

Fig. 3. Distribution of search points for genetic algorithms using the crossing operation (a), using the mutation operation (b), using the crossing and mutation operations (c), the particle swarm method (d) (see also p. 37)

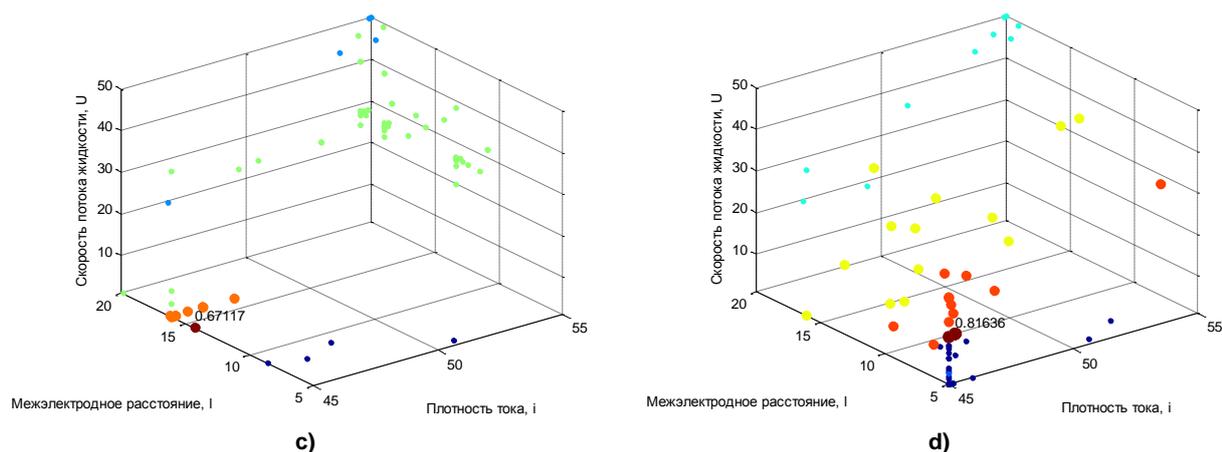


Рис. 3. Окончание  
Fig. 3. End

## 6. Обсуждение результатов

Эффективность ГА, применительно к решению задачи многопараметрической оптимизации процесса нанесения ГП зависит от факта использования операций скрещивания и мутации. Применение операции скрещивания в ГА показало низкую эффективность ввиду того, что данная операция увеличивает разброс точек поиска, вследствие чего увеличивается вероятность попадания в точку локального экстремума.

Применение операции мутации вносит большее разнообразие в набор решений, благодаря чему позволяет вести поиск из точки локального оптимума, но это приводит к увеличению количества итераций, требуемых для определения наилучшего решения. Исключительное применение операции мутации в ГА позволяет получить наилучшее приближение к точке экстремума, однако данный метод требует большего числа итераций, соответственно вычислительных ресурсов и времени на поиск оптимального решения.

Применение МРЧ позволяет получить результат поиска экстремума коэффициента равномерности несущественно ниже, но благодаря планомерному продвижению поиска к экстремуму требуется меньшее количество итераций.

## Заключение

Таким образом, применение эволюционных алгоритмов, таких как ГА и МРЧ, при оптимизации процессов нанесения ГП является целесообразным подходом к поиску его оптимальных параметров, обеспечивающих равномерность покрытия и эффективность процесса. Помимо этого, данные методы могут показать большую эффективность за счет дополнительной их настройки (выбора размера набора решений, подбора коэффициентов интенсивности мутации для ГА и постоянных ускорений для МРЧ).

В целом решение многопараметрической оптимизационной задачи управления процессом нанесения ГП с применением эволюционных и роевых методов позволяют сократить затраты на проведение экспериментов, улучшить эффективность процесса управления нанесением ГП, повысить его качественные показатели.

## Список литературы

1. Соловьев Д.С., Потлов А.Ю., Литовка Ю.В. Снижение неравномерности толщины гальванического покрытия, наносимого с циклическим включением анодных секций // Вестник машиностроения. 2016. № 8. С. 78–84.
2. Автоматизированная система управления гальваническими процессами при реверсировании тока с отключаемыми анодными секциями / В.В. Конкина, Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка, И.А. Мукина // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 2. С. 67–77.
3. Соловьев Д.С., Мукина И.А., Литовка Ю.В. Особенности оптимального управления гальваническими процессами в многоанодной ванне с различными значениями силы тока // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 9. С. 631–636. DOI: 10.17587/mau.18.631-636

4. Литовка Ю.В., Кондрашин Р.С. Моделирование и оптимизация импульсных токовых режимов нанесения гальванических покрытий // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 1999. Т. 5, № 1. С. 26.
5. Литовка Ю.В., Романенко А.В., Афанасьев А.В. Моделирование и оптимизация процесса нанесения гальванических покрытий в условиях реверсирования тока // Теоретические основы химической технологии. 1998. Т. 32, № 3. С. 301–304.
6. Пат. 6027631 США. Electroplating system with shields for varying thickness profile of deposited layer / E.K. Broadbent. Опубл. 22.02.2000.
7. Литовка Ю.В., Тарураев В.А. Оптимизация гальванической ванны с подвижными анодами // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Автоматика. Управление. 1997. Т. 1, вып. 2. С. 41–48.
8. Литовка Ю.В., Као В.З., Соловьев Д.С. Оптимальное управление гальванической ванной с дополнительными катодами и биполярными электродами // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2016. № 1 (83). С. 26–28.
9. 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.
10. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Многомерная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 2 (72). С. 34–39.
11. Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами / А.Г. Лютов, А.Р. Ишкулова // Мехатроника, автоматизация и управление - 2017. - Т. 19, № 3. – С. 185–191. DOI: 10.17587/mau.18.185-191
12. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 4 (70). С. 45–48.
13. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Оптимизация управления процессом нанесения гальванического покрытия в ваннах с многосекционными анодами с использованием генетических алгоритмов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2017. Т. 17, № 1. С. 103–111. DOI: 10.14529/ctcr170111
14. Захарова Е.М., Минашина И.К. Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. 2014. Т. 14, № 3. С. 256–274.
15. Казакова Е.М. Краткий обзор методов оптимизации на основе роя частиц // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 39, № 2. С. 150–174. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-39-2-150-174

#### References

1. Solov'ev D.S., Potlov A.Yu., Litovka Yu.V. [Reducing the unevenness of the thickness of the galvanic coating applied with cyclic inclusion of the anode sections]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2016;8:78–84. (In Russ.)
2. Konkina V.V., Solov'ev D.S., Litovka Yu.V., Mukina I.A. Automated control system of galvanic processes during reversing of current with the disconnected anodic sections. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Engineering & automation problems*. 2016;2:67–77. (In Russ.)
3. Solovjev D.S., Mukina I.A., Litovka Yu.V. Specific features of the optimal control of the electroplating processes in a multianode bath with different amperage values. *Mechatronics, automation, control = Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2017;18(9):631–636. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.18.631-636
4. Litovka Yu.V., Kondrashin R.S. [Modeling and optimization of pulsed current modes of electroplating]. *Transactions of the Tambov state technical university*. 1999;5(1):26. (In Russ.)
5. Litovka Yu.V., Romanenko A.V., Afanas'ev A.V. [Modeling and optimization of the electroplating process under current reversal conditions]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 1998;32(3):301–304. (In Russ.)
6. Broadbent E.K. *Electroplating system with shields for varying thickness profile of deposited layer*. Patent USA, no. 6027631, 22.02.2000.
7. Litovka Yu.V., Taruraev V.A. [Optimization of a galvanic bath with movable anodes]. *Izvestiya Tula State University. Series: Computer engineering. Automation. Management*. 1997;1(2):41–48. (In Russ.)

8. Litovka Yu.V., Kao V.Z., Solov'ev D.S. [Optimal control of the galvanic bath with additional cathodes and bipolar electrodes]. *Mathematical methods in engineering and technology*. 2016;1(83):26–28. (In Russ.)
9. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. Mathematical model and numerical scheme for calculation of electric fields in galvanic baths with non-conductive screen. *Differential Equations and Control Processes*. 2021;(3):85–97. (In Russ.)
10. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes. *Vestnik UGATU*. 2016;20(2(72)):34–39. (In Russ.)
11. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Automated System the Extreme Multidimensional Management of Process Plating. *Mechatronics, automation, control = Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2017;19(3):185–191. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.18.185-191
12. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes. *Vestnik UGATU*. 2015;19(4(70)):45–48. (In Russ.)
13. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Optimization of Control of Plating Process in Bath with Multi-section Anodes with Use of Genetic Algorithms. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2017;17(1):103–111. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170111
14. Zakharova E.M., Minashina I.K. Review of multidimensional optimization techniques. *Information Processes*. 2014;14(3):256–274. (In Russ.)
15. Kazakova E.M. A Concise Overview of Particle Swarm Optimization Methods. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2022;39(2):150–174. (In Russ.) DOI: 10.26117/2079-6641-2022-39-2-150-174

#### **Информация об авторах**

**Лютлов Алексей Германович**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; lutov1@mail.ru.

**Ишkulова Алия Рифовна**, канд. техн. наук, доц. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; aliya.ishkulova@yandex.ru.

#### **Information about the authors**

**Alexey G. Lutov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; lutov1@mail.ru.

**Aliya R. Ishkulova**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Aircraft Manufacturing Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; aliya.ishkulova@yandex.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 07.12.2023**

**The article was submitted 07.12.2023**