

## ДВОПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАНУ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ КРЕМНІЮ В ПРОЦЕСАХ ГЛИБОКОГО ПЛАЗМОХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ МЕМС

*У науці і техніці все більше зростає необхідність раціонального використання праці вчених і інженерів, а також засобів виробництва – технічного обладнання і матеріалів. Одним з напрямків підвищення продуктивності наукової праці є застосування передових математичних методів і обчислювальних засобів. До таких методів відноситься планування експерименту. Його якісна і оптимальна реалізація дозволяє успішно вирішувати наукові, виробничі та технологічні проблеми.*

*В даний час широко використовують різні методи планування при проведенні досліджень. Планування експерименту припускає одночасну зміну всіх факторів, які впливають на досліджуваний процес, що дозволяє встановити ступінь взаємодії факторів і зменшити кількість експериментів. Доцільно проводити досліді при мінімальних вартісних витратах. Але в той же момент при плануванні ще одним важливим критерієм є час. Це особливо актуально при дослідженні дорогих і тривалих процесів. Тому мета планування експерименту полягає в створенні схеми, яка необхідна для отримання якомога більшої інформації при найменших витратах та з найкоротшою тривалістю дослідження. Більш точно планування експерименту можна визначити як процедуру вибору числа і умов проведення дослідів, достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю. Важливою перевагою є його універсальність, придатність в величезній більшості областей. Об'єкт дослідження: процеси оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними і часовими витратами. Предмет дослідження: метод двопараметричної оптимізації, розроблений на основі алгоритму гравітаційного пошуку з допомогою узагальненого критерію вартості та часу проведення експерименту. При дослідженні шорсткості поверхні кремнію в процесах глибокого плазмохімічного травлення МЕМС проаналізовано працездатність та ефективність методу двопараметричної оптимізації у порівнянні з початковим та оптимальним планами експерименту (без урахування узагальненого критерію).*

*Ключові слова: план експерименту, початковий план, гравітаційний пошук, двопараметрична оптимізація, узагальнений критерій, нормуючі значення, вартість.*

**Вступ.** Сучасні методи планування експерименту і обробки його результатів, розроблені на основі математичної статистики, дозволяють істотно скоротити число дослідів, підвищити точність і значно зменшити обсяг експериментальних досліджень. Це зменшує терміни їх проведення і в значній мірі підвищує їх економічність і ефективність.

Знання та використання цих методів робить працю експериментатора більш цілеспрямованою і організованою, істотно підвищує як продуктивність праці, так і надійність одержуваних результатів.

За допомогою розробленого методу гравітаційного пошуку [1] проведено двопараметричну оптимізацію з використанням узагальненого критерію вартості та часу проведення експерименту. Реалізація полягає у перестановці рядків матриці планування та знаходження мінімального значення вартості перестановки (тривалості проведення) по відношенню до першого рядка матриці.

Працездатність та ефективність двопараметричної оптимізації проаналізовано на прикладі дослідження шорсткості поверхні кремнію в процесах глибокого плазмохімічного травлення МЕМС [2].

Об'єкт дослідження: процес двопараметричної оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними та часовими витратами.

Предмет дослідження: метод побудови матриці планування експерименту, оптимальної за вартістю реалізації та часовими витратами, з використанням алгоритму гравітаційного пошуку та узагальненим критерієм вартості та тривалості проведення експерименту.

Мета дослідження: оцінка впливу узагальненого критерію вартості та часу проведення експерименту на оптимізацію плану багатofакторного експерименту.

**Аналіз існуючих публікацій.** Для вирішення задачі оптимізації за вартісними (часовими) витратами можливе застосування методів комбінаторної оптимізації [3-6]. Відомі приклади побудови багатofакторних планів експерименту, засновані на використанні таких методів оптимізації: метод табу – пошуку [7], стрибаючих жаб [8], мурашиний алгоритм [9]. Була доведена ефективність застосування цих методів при дослідженні ряду різних об'єктів: технологічних процесів, приладів, систем. Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки. Їх суттєвими недоліками є: низька швидкодія, не завжди знаходиться точне рішення, а вдається знайти лише близьке до оптимального значення.

Зважаючи на це, доцільно для порівняння результатів оптимізації планів експерименту дослідити метод гравітаційного пошуку [1], в якому використовуються аналогії руху твердих тіл внаслідок їх гравітаційної взаємодії [10]. Його реалізація полягає у перестановці рядків матриці планування експерименту та знаходження мінімального значення вартості перестановки по відношенню до першого рядка матриці.

Приклад двопараметричної оптимізації було розглянуто при дослідженні ротатбельного центрального композиційного планування (РЦКП) [11].

**Основні матеріали дослідження.** Для дослідження шорсткості поверхні кремнію в процесах глибокого плазмохімічного травлення МЕМС було розроблено алгоритм оптимізації планів проведення експерименту, що заснований на використанні методу гравітаційного пошуку. Раніше цим методом було досліджено фотоелектричні перетворювачі кутових переміщень [1]. При цьому, в якості критерію оптимізації застосовувалась мінімальна вартість реалізації експерименту. Основною метою цієї статті є дослідження впливу на процес оптимізації не тільки вартості, але і тривалості проведення експерименту

$$S_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$t_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $S_{i,j}$  – вартість установки  $i$ -го фактору в  $j$ -му досліді;

$t_{i,j}$  – тривалість установки  $i$ -го фактору в  $j$ -му досліді;

$k$  – кількість факторів;

$n$  – число дослідів.

При дослідженні плазмохімічного травлення МЕМС та складанні плану експерименту були враховані три вхідних фактори процесу, імовірно здатних найбільшою мірою впливати на оптимізацію процесу:  $x_1$  – відношення тривалості стадій пасивації і травлення,  $x_2$  – тиск в реакторі, Па,  $x_3$  – температура електрода-підложкотримача, °С.

Середньоарифметичне відхилення профілю є параметром оптимізації. Для побудови математичної моделі у вигляді  $U = f(x_1, x_2, x_3)$  достатньо застосувати повний факторний експеримент  $2^3$ .

Повний опис процесу дослідження шорсткості поверхні кремнію в процесах глибокого плазмохімічного травлення МЕМС наведено у роботі [2].

У табл. 1 показана початкова матриця планування експерименту.

Таблиця 1

Початкова матриця планування експерименту

Номер досліду	Фактори		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Вартості змін значень рівнів факторів приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Вартості змін значень рівнів факторів

Перехід рівнів	S <sub>x1</sub> , у.о.	S <sub>x2</sub> , у.о.	S <sub>x3</sub> , у.о.
-1 → +1	4	10	20
+1 → -1	6	14	16

Час змін значень рівнів факторів приведені в табл. 3.

Таблиця 3

Час змін значень рівнів факторів

Перехід рівнів	t <sub>x1</sub> , хв.	t <sub>x2</sub> , хв.	t <sub>x3</sub> , хв.
-1 → +1	13	8	20
+1 → -1	11	12	14

Вартість реалізації та тривалість проведення початкового плану експерименту складає S<sub>поч</sub> = 88 у.о. та t<sub>поч</sub> = 133 хв. відповідно.

Оптимальні за вартістю та тривалістю проведення плани експерименту, отримані з використанням методу гравітаційного пошуку, представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Оптимальні плани експерименту, отримані методом гравітаційного пошуку

Вартість експерименту, у.о.				Тривалість експерименту, хв.			
Номер досліду	Фактори			Номер досліду	Фактори		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>		x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	2	-1	+1	-1
3	+1	+1	-1	3	+1	+1	-1
4	-1	+1	-1	4	+1	-1	-1
5	-1	+1	+1	5	+1	-1	+1
6	+1	+1	+1	6	+1	+1	+1
7	+1	-1	+1	7	-1	+1	+1
8	-1	-1	+1	8	-1	-1	+1

Вартість реалізації та тривалість проведення оптимальних планів експерименту складає  $S_{\text{опт}} = 64$  у.о. та  $t_{\text{опт}} = 48$  хв. У порівнянні з початковими планами експерименту маємо виграти у 1,4 та 1,6 разів відповідно.

Також метод гравітаційного пошуку було використано для двопараметричної оптимізації плану експерименту, де в якості критерію оптимізації використовується узагальнений критерій вартості та часу проведення експерименту

$$\frac{K_1}{N_1} \sum S_{i \rightarrow j} + \frac{K_2}{N_2} \sum t_{i \rightarrow j} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $S_{i \rightarrow j}$  – вартість переходу з  $i$ -го експерименту в  $j$ -ий;

$t_{i \rightarrow j}$  – час переходу з  $i$ -го експерименту в  $j$ -ий;

$K_1, K_2$  – вагові коефіцієнти для вартісного і часового параметрів оптимізації відповідно;

$N_1, N_2$  – нормуючі значення для вартісного і часового параметрів оптимізації відповідно.

Нормуючі значення визначаються наступним способом:

$$N_1 = \max \{S_{1 \rightarrow 2}, S_{1 \rightarrow 3}, \dots, S_{2 \rightarrow 1}, S_{2 \rightarrow 3}, \dots, S_{i \rightarrow j}, \dots, S_{n-1 \rightarrow n}\}; \quad (4)$$

$$N_2 = \max \{t_{1 \rightarrow 2}, t_{1 \rightarrow 3}, \dots, t_{2 \rightarrow 1}, t_{2 \rightarrow 3}, \dots, t_{i \rightarrow j}, \dots, t_{n-1 \rightarrow n}\}.$$

Вагові коефіцієнти  $K_1, K_2$  дозволяють варіювати значимістю відповідного параметра оптимізації: чим вище значення вагового коефіцієнта, тим вище значимість відповідного параметра оптимізації.

Використовуючи метод гравітаційного пошуку, проведено двопараметричну оптимізацію вихідного плану. Було отримано оптимальні плани для вагових коефіцієнтів  $K_1 = 1, K_2 = 2$  та  $K_1 = 2, K_2 = 1$ . Нормуючі значення дорівнюють  $N_1 = 40$  у.о.,  $N_2 = 45$  хв. Відповідно до вагових коефіцієнтів, отримуємо такі узагальнені критерії оптимізації:  $K'_1 = \frac{1}{40} = 0,025, K'_2 = \frac{2}{45} = 0,04$  ( $K_1 = 1, K_2 = 2$ ) та  $K'_1 = \frac{2}{40} = 0,05, K'_2 = \frac{1}{45} = 0,02$  ( $K_1 = 2, K_2 = 1$ ) відповідно. Плани експерименту, оптимальні за вартістю та часом проведення з використанням  $K'_1$  та  $K'_2$ , показано у табл. 5.

Таблиця 5

Оптимальні плани експерименту з використанням узагальненого критерію

Номер досліджу	$K_1 = 1, K_2 = 2$			Номер досліджу	$K_1 = 2, K_2 = 1$		
	Фактори				Фактори		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$		$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	2	+1	-1	-1
3	+1	+1	-1	3	+1	+1	-1
4	-1	+1	-1	4	-1	+1	-1
5	-1	+1	+1	5	-1	+1	+1
6	+1	+1	+1	6	+1	+1	+1
7	+1	-1	+1	7	+1	-1	+1
8	-1	-1	+1	8	-1	-1	+1

При дослідженні оптимальних планів експерименту з використанням узагальненого критерію, ми бачимо, що матриці з ваговими коефіцієнтами  $K_1 = 1, K_2 = 2$  та  $K_1 = 2, K_2 = 1$  не відрізняються між собою. При проведенні експерименту зі значеннями коефіцієнтів

$K_1 = 1, K_2 = 2$ , вартість реалізації та тривалість проведення досліду складає  $S_{\text{опт}} = 64$  у.о. та  $t_{\text{опт}} = 88$  хв. відповідно. Зважаючи на те, що оптимальні плани експериментів однакові, вартість реалізації та тривалість проведення технологічного процесу для випадку, коли  $K_1 = 2, K_2 = 1$  такі ж, як і при  $K_1 = 1, K_2 = 2$ , тому вплив вагових коефіцієнтів незначний.

**Висновки.** Для двопараметричної оптимізації планів багатofакторного експерименту за вартісними та часовими витратами було використано метод гравітаційного пошуку.

Доведена його працездатність та ефективність при дослідженні шорсткості поверхні кремнію в процесах глибокого плазмохімічного травлення МЕМС. Результати показали, що у порівнянні з початковими планами експериментів, маємо вигравш за вартісними та часовими витратами у 1,4 та 1,6 разів відповідно.

У результаті дослідження встановлено, що у нашому прикладі вплив вагових коефіцієнтів незначний. Має сенс дослідити двопараметричну оптимізацію для більшої кількості факторів і з більшою різницею у значеннях вагових коефіцієнтів.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Кошовий М. Д., Малкова Г. В. Застосування методу гравітаційного пошуку для мінімізації вартості проведення багатofакторного експерименту. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. 2020. №69. С. 51-58.

2. Кошевой Н. Д., Костенко Е.М. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента: монография. Полтава: изд. Шевченко Р.В., 2013. 317 с.

3. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing, Applied Optimal Designs, 2007, No. 4, pp. 147–179.

4. Bailey R. A., Cameron P. G. Combinatorics of optimal designs, Surveys in Combinatorics, 2009, Vol. 365, pp. 19–73.

5. Rodrigues M. I., Iemma A. F. Experimental Design and Process Optimization. N.-Y., CRC Press, 2016, 336 p.

6. Яковлев С.В. Свойства задач комбинаторной оптимизации на полиэдрально-сферических множествах, Кибернетика и системный анализ, 2018, Т. 54, №1, С. 99–109.

7. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. Радиоелектроніка, інформатика, управління. 2018. №4. С. 179-187.

8. Кошевой Н.Д., Муратов В.В. Применение алгоритма прыгающих лягушек для оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента. Радиоелектронні і комп'ютерні системи. 2018. № 4. С. 53-60.

9. Кошевой Н.Д., Чуйко А.С. Применение муравьиных алгоритмов для оптимизации факторных планов эксперимента. Математичне моделювання. 2013. №1. С. 92-97.

10. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. Информационные технологии. 2012. №7. С. 1-32.

11. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А.С. Оптимизация комбинаторных планов эксперимента. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2013. №43. С. 26-33.

#### REFERENCES:

1. Koshevoy M.D., Malkova H.V. application of the gravity search method to minimize the cost of conducting a multifactor experiment. Collection of Military Institute of Kiev National Taras Shevchenko University. 2020. No. 69. pp. 51-58.

2. Koshevoy N.D., Kostenko E.M. Experimentally-optimal cost and time planning of the experiment: a monograph. Poltava: ed. Shevchenko R.V., 2013. 317 p.

3. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing, Applied Optimal Designs, 2007, No. 4, pp. 147–179.

4. Bailey R. A., Cameron P. G. Combinatorics of optimal designs, Surveys in Combinatorics, 2009, Vol. 365, pp. 19–73.

5. Rodrigues M. I., Iemma A. F. Experimental Design and Process Optimization. N.-Y., CRC Press, 2016, 336 p.

6. Yakovlev S.V. Properties of combinatorial optimization problems over polyhedral-spherical sets, Cybernetics and Systems Analysis, 2018, Vol. 54, No. 1, pp. 99–109.

7. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Belyaeva A.A. Comparative analysis of optimization methods in the study of weighing system and thermostat. Radio electronics, informatics, control. 2018. No. 4, pp. 179-187.
8. Koshevoy N.D., Muratov V.V. Application of the jumping frog algorithm for time and cost optimization of plans for a full factorial experiment. Radioelectronic and computer systems. 2018. No. 4, pp. 53-60.
9. Koshevoy N.D., Chuiko A.S. Application of ant algorithms to optimize factorial experimental designs. Mathematical modeling. 2013. No. 1, pp. 92-97.
10. Karpenko A.P. Population algorithms for global search engine optimization. Review of new and little-known algorithms. Information Technology. 2012. No. 7, pp. 1-32.
11. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Chuiko A.S. Optimization of combinatorial experimental plans. Collection of research papers of the National Mining University. 2013. No. 43. pp. 26-33.

**D.Sci. Tech., prof. Koshevoy N.D., Malkova A.V.**

## **TWO-PARAMETER OPTIMIZATION OF THE EXPERIMENTAL PLAN WHEN STUDYING THE ROUGHNESS OF THE SILICON SURFACE DURING DEEP PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF MEMS ELEMENTS**

*In science and technology, the need for the rational use of the labor of scientists and engineers, as well as the means of production - technical equipment and materials - is growing more and more. One of the ways to increase the productivity of scientific work is the use of advanced mathematical methods and computational tools. These methods include experiment planning. Its high-quality and optimal implementation allows us to successfully solve scientific, production and technological problems.*

*Currently, various planning methods are widely used in research. The planning of an experiment involves a simultaneous change in all factors affecting the process under study, which makes it possible to establish the degree of interaction of factors and to reduce the number of experiments. It is advisable to conduct experiments with minimal cost. But at the same time, when planning, another important criterion is time. This is especially true when examining expensive and time-consuming processes. Therefore, the goal of experiment planning is to create a scheme that is necessary to obtain as much information as possible at the lowest cost and with a short study duration. More precisely, the planning of an experiment can be defined as a procedure for choosing the number and conditions of experiments that are necessary and sufficient to solve the problem with the required accuracy. An important advantage is its versatility, suitability in most areas. Object of research: the processes of optimizing the plans of a multifactorial experiment in terms of cost and time costs. Subject of research: a two-parameter optimization method developed on the basis of a gravity search algorithm using a generalized criterion of cost and time of the experiment. In the study of the roughness of the silicon surface in the processes of deep plasma-chemical etching of MEMS elements, the operability and efficiency of the two-parameter optimization method were analyzed in comparison with the initial and optimal experimental plans (without taking into account the generalized criterion).*

*Key words: experimental plan, initial plan, gravity search, two-parameter optimization, generalized criterion, normalizing values, cost.*