

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОШУКУ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ВАРТОСТІ ПРОВЕДЕННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

*Експериментальні методи дослідження все більше застосовують у промисловості при оптимізації виробничих процесів. Експерименти, як правило, є багатофакторними і пов'язані з оптимізацією якості матеріалів, пошуком оптимальних умов проведення технологічних процесів, розробкою найбільш раціональних конструкцій устаткування і т.д. Застосування планування експерименту робить поведінку експериментатора цілеспрямованою і організованою, істотно сприяє підвищенню продуктивності праці та надійності отриманих результатів. Важливою перевагою є його універсальність, придатність в величезній більшості областей досліджень.*

*При реалізації промислового експерименту головним завданням є отримання максимального об'єму корисної інформації про вплив окремих факторів виробничого процесу за умови проведення мінімальної кількості дорогих спостережень за найкоротший проміжок часу. Тому важливого значення набуває підвищення ефективності експериментальних досліджень при мінімальних часових та вартісних витратах. Для цього доцільно розробляти системи автоматизації експериментів, які дозволять скоротити терміни проведення експериментальних досліджень і зменшити витрати на них. Об'єкт дослідження: процеси оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними і часовими витратами. Предмет дослідження: метод оптимізації, розроблений на основі алгоритму гравітаційного пошуку, який полягає у порівнянні сили тяжіння (вартості) першого рядка матриці планування експерименту до наступних рядків матриці.*

*При дослідженні фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень було проаналізовано працездатність та ефективність методу гравітаційного пошуку у порівнянні з раніше розробленими методами: аналіз перестановок рядків, рою частинок, табу-пошуку.*

*Показано зменшення вартості проведення плану експерименту та ефективність для рішення задач оптимізації в порівнянні з початковим планом та реалізацією вищевказаних методів.*

*Ключові слова: гравітаційний пошук, план експерименту, матриця планування, оптимальний план, оптимізація, вартість, порівняльна характеристика, виграш.*

**Вступ.** Експериментальні методи широко використовуються як в науці, так і в промисловості. Основна мета наукового дослідження полягає в тому, щоб показати статистичну значущість ефекту впливу певного фактору на досліджуваний процес. В умовах промислового експерименту основна мета, зазвичай, полягає в отриманні максимальної кількості об'єктивної інформації про вплив досліджуваних факторів на виробничий процес за допомогою найменшого числа дорогих спостережень та за найкоротший проміжок часу. Якісне і оптимальне планування експерименту дозволяє успішно вирішувати наукові, виробничі та технологічні проблеми [1].

Розроблено метод оптимізації багатофакторного експерименту за допомогою гравітаційного пошуку [2]. У методі використовуються аналогії руху твердих тіл внаслідок їх гравітаційної взаємодії [3], його реалізація полягає у перестановці рядків матриці планування експерименту та знаходження мінімального значення вартості перестановки по відношенню до першого рядка матриці.

Працездатність та ефективність методу гравітаційного пошуку доведена на прикладі дослідження фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень [4] та у порівнянні з розробленими раніше: аналіз перестановок рядків, рою частинок та табу – пошуку.

Об'єкт дослідження: процеси оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними і часовими витратами.

Предмет дослідження: метод побудови матриці планування експерименту, оптимальної за вартістю реалізації або часовими витратами, з використанням алгоритму гравітаційного пошуку [2, 3].

Мета дослідження: розробка методу оптимізації планів багатофакторного експерименту з використанням гравітаційного пошуку [2, 3] та проведення порівняльного аналізу з раніше розробленими методами (аналіз перестановок рядків, рою частинок, табу – пошуку [4 - 6]).

**Аналіз останніх публікацій.** Проведений аналіз існуючих публікацій свідчить про те, що є багато прикладів побудови планів багатофакторних експериментів [7 - 9]. Такі методи як алгоритм стрибаючих жаб [10], мурашиний алгоритм [11], аналіз перестановок рядків [4], табу – пошуку [5], рою частинок [6] були розроблені раніше, про що свідчить наявність великої кількості матеріалів.

Перелічені методи використовуються для оптимізації матриці планування експерименту за вартісними (часовими) витратами та мають свої переваги та недоліки. Перевагами цих методів є працездатність та ефективність, яка доведена при дослідженні багатьох технологічних процесів, приладів та систем. Серед недоліків можна виділити низьку швидкодію (для повного перебору всіх рядків матриці планування необхідно багато часу), наявність не завжди оптимальних рішень та обмежена кількість факторів  $k$ .

Тому має сенс дослідити метод гравітаційного пошуку та зробити порівняльний аналіз вищевказаних методів з розробленим на прикладі дослідження фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень [4].

**Основні матеріали дослідження.** У загальному випадку, задача вибору оптимального плану багатофакторного експерименту може бути сформульована таким чином. Є повний зважений орієнтований граф  $G$  з безліччю вершин  $N = 2^k$ ,  $k$  – кількість факторів. Ваги всіх дуг позитивні. Необхідно знайти шлях з мінімальною вартістю  $S_{заг}$  проведення експерименту

$$S_{заг} = \sum_{j=2}^N \sum_{i=1}^k S_{ij} \rightarrow \min ,$$

де  $S_{i,j}$  – вартість переходу від  $i$ -го до  $j$ -го дослідю.

Оптимальним рішенням є план, отриманий перестановками, який має мінімальну вартість проведення експерименту. З ростом числа факторів  $k$  кількість перетворень істотно зростає [4].

У табл. 1 наведені значення кількості факторів  $i$  перетворень для  $k = 2 \dots 5$ .

Таблиця 1

Кількість перетворень планів багатфакторних експериментів (БФЕ) для  $k = 2 \dots 5$

| Кількість факторів | Кількість дослідів у плані БФЕ | Кількість перетворень при перестановці рядків матриці планування | Кількість перетворень при перестановці стовпців матриці планування |
|--------------------|--------------------------------|--|--|
| 2                  | 4                              | 24   | 2  |
| 3                  | 8                              | 40320  | 6  |
| 4                  | 16                             | $2,092 \times 10^{13}$   | 24   |
| 5                  | 32                             | $2,63 \times 10^{35}$  | 120  |

Для проведення дослідження необхідно обрати фактори, що впливають на процес, та параметр оптимізації. При дослідженні фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень у якості факторів обрані:  $x_1$  – кут відхилення центральної осі випромінюючого елемента (далі – ВЕ) від центральної осі приймаючого елемента (далі – ПЕ),  $x_2$  – інтервал між центральними осями ВЕ та ПЕ,  $x_3$  – дистанція між ВЕ та ПЕ. Напруга  $U$ , мВ є параметром оптимізації. Для побудови математичної моделі у вигляді  $U = f(x_1, x_2, x_3)$  достатньо застосувати повний факторний експеримент  $2^3$ . Опис процесу дослідження фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень наведено у роботі [4]. У табл. 2 показана початкова матриця планування експерименту.

Таблиця 2

Початкова матриця планування експерименту

| Номер дослідю | Фактори |       |       |
|---------------|---------|-------|-------|
|               | $x_1$   | $x_2$ | $x_3$ |
| 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 таблиці 3.

Таблиця 3

Вартості змін значень рівнів факторів

| Перехід рівнів      | $S_{x_1}$ , у.о. | $S_{x_2}$ , у.о. | $S_{x_3}$ , у.о. |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| -1 $\rightarrow$ +1 | 3,2              | 6,8              | 7                |
| +1 $\rightarrow$ -1 | 3                | 5,5              | 6,4              |

Вартість реалізації початкового плану експерименту складає  $S_{\text{поч}} = 47,9$  у.о.

Для оптимізації плану повного факторного експерименту ( $k = 3$ ) за вартісними (часовими) витратами було розроблено та досліджено метод гравітаційного пошуку. Його реалізація полягає у перестановці рядків матриці та знаходження мінімального значення вартості перестановки по відношенню до першого рядка матриці. Сутність застосування методу гравітаційного пошуку, схема реалізації якого показана на рис. 1, полягає в наступному.

**Етап 1.** Генерування початкової матриці планування експерименту (в залежності від кількості факторів).

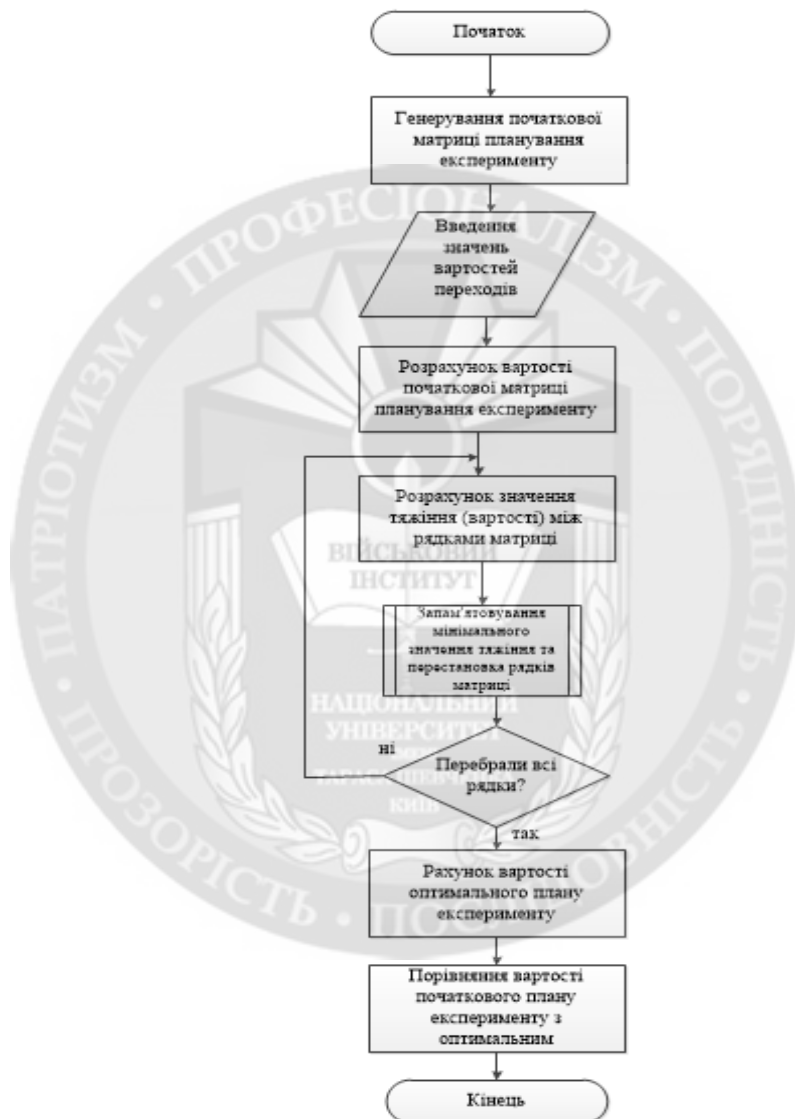


Рисунок 1 – Схема реалізації методу гравітаційного пошуку

**Етап 2.** Введення вартості переходів між рівнями для кожного із факторів.

**Етап 3.** Розрахунок вартості початкової матриці планування експерименту.

**Етап 4.** Розрахунок значення тяжіння (вартості) першого рядка матриці планування до усіх наступних (в залежності від кількості факторів).

**Етап 5.** Запам'ятовування мінімального значення тяжіння та перестановка рядків матриці.

**Етап 6.** Здійснення розрахунку наступного переходу, починаючи від попереднього мінімального значення.

**Етап 7.** Виконання перевірки, чи проаналізовані всі переходи. Якщо всі переходи проаналізовані, то виконується крок 8. Якщо ні – крок 6 до завершення всіх ітерацій.

**Етап 8.** Розрахунок вартості оптимальної матриці планування експерименту.

**Етап 9.** Порівняння вартості початкового плану експерименту з оптимальним.

**Етап 10.** Виведення результатів дослідження.

Оптимальний за вартістю проведення план експерименту, отриманий з використанням методу гравітаційного пошуку, представлений в табл. 4.

Таблиця 4

Оптимальний план експерименту, отриманий методом гравітаційного пошуку

| 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             |

Вартість реалізації оптимального плану експерименту становить 31,7 у.о.

Табл. 5 відображає раніше розроблені плани експерименту для дослідження фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень [4,5].

Таблиця 5

Плани експерименту для дослідження фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень

| Аналіз перестановок рядків |                |                |                | Рой частинок  |                |                |                | Табу-пошук    |                |                |                |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Номер досліду              | Фактори        |                |                | 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> |               | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> |
| 1                          | -1             | -1             | -1             | 1             | +1             | -1             | -1             | 1             | +1             | +1             | -1             |
| 2                          | -1             | -1             | +1             | 2             | +1             | +1             | -1             | 2             | -1             | +1             | -1             |
| 3                          | +1             | -1             | +1             | 3             | -1             | +1             | -1             | 3             | -1             | +1             | +1             |
| 4                          | +1             | -1             | -1             | 4             | -1             | +1             | +1             | 4             | +1             | +1             | +1             |
| 5                          | +1             | +1             | -1             | 5             | +1             | +1             | +1             | 5             | +1             | -1             | +1             |
| 6                          | +1             | +1             | +1             | 6             | +1             | -1             | +1             | 6             | +1             | -1             | -1             |
| 7                          | -1             | +1             | +1             | 7             | -1             | -1             | +1             | 7             | -1             | -1             | -1             |
| 8                          | -1             | +1             | -1             | 8             | -1             | -1             | -1             | 8             | -1             | -1             | +1             |

Вартість реалізації плану експерименту, отриманого методом аналізу перестановок рядків, складає 39,8 у.о., рою частинок – 34,9 у.о., табу – пошуку – 35,1 у.о.

У табл. 6 приведено порівняльний аналіз початкового плану експерименту з планами, отриманими наступними методами оптимізації: аналіз перестановок рядків, рою частинок, табу – пошуку, гравітаційного пошуку.

## Порівняльний аналіз методів

| Метод оптимізації          | Вартість, у.о. | Виграш, разів |
|----------------------------|----------------|---------------|
| Початковий план            | 47,9           |               |
| Гравітаційний пошук        | 31,7           | 1,51          |
| Аналіз перестановок рядків | 39,8           | 1,2           |
| Рою частинок               | 34,9           | 1,37          |
| Табу-пошук                 | 35,1           | 1,36          |

У результаті порівняння вартостей планів експерименту, отриманих різними методами оптимізації, можна зробити висновок, що план, оптимізований за методом гравітаційного пошуку, дає максимальний виграш у вартості реалізації. Це підтверджує працездатність та ефективність методу гравітаційного пошуку для дослідження фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень.

**Висновки.** Для оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними витратами розроблено метод гравітаційного пошуку.

Доведена його працездатність та ефективність для дослідження фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень. Результати досліджень показали, що розроблений метод гравітаційного пошуку дає виграш у вартості в 1,51 рази, порівняно з початковим планом експерименту. Метод буде кращі за вартістю реалізації плани експерименту у порівнянні з методами аналізу перестановок рядків, рою частинок та табу-пошуку.

Перспективи подальших досліджень полягають у створенні та застосуванні програмного забезпечення для оптимізації цим методом планів багатофакторних експериментів з кількістю факторів  $k > 3$ .

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Воронина О.А. Математические основы планирования и проведения эксперимента: учебное пособие. Орел: изд. ОрелГТУ, 2007. 124 с.
2. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 446 с.
3. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. Информационные технологии. 2012. №7. С. 1-32.
4. Кошевой Н. Д., Костенко Е.М. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента: монография. Полтава: изд. Шевченко Р.В., 2013. 317 с.
5. 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. DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-17.
6. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма оптимизации роєм частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. Радиоелектроніка, інформатика, управління. 2018. №1. С. 41-49. DOI 10.15588/1607-3274-2018-1-5.
7. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М. Метод итерационного планирования оптимальных по стоимостным и временным затратам экспериментов. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. 2009. №19. С. 44-48.
8. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М. Оптимальное планирование эксперимента для исследования динамических объектов. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. 2009. №20. С. 57-62.
9. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Заболотний А.В. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов. АСУ и приборы автоматики. 2009. №147. С. 38-41.
10. 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.
11. Кошевой Н.Д., Чуйко А.С. Применение муравьиных алгоритмов для оптимизации факторных планов эксперимента. Математичне моделювання. 2013. №1. С. 92-97.

## REFERENCES:

1. Voronina O.A. Mathematical foundations of planning and conducting an experiment: a tutorial. Orel: ed. Orel State Technical University, 2007. 124 p.
2. Karpenko A.P. Modern search engine optimization algorithms. Algorithms Inspired by Nature: a tutorial. M.: Publishing house of MSTU. N.E.Bauman, 2014. 446 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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. DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-17.
6. Koshevoy N.D., Belyaeva A.A. Application of particle swarm optimization algorithm to minimize the cost of a multivariate experiment. Radio electronics, informatics, control. 2018. No. 1, pp. 41 - 49. DOI 10.15588/1607-3274-2018-1-5.
7. Koshevoy N.D., Kostenko E.M. Method of iterative planning of optimal in terms of cost and time costs.experiments. Collection of Military Institute of Kiev National Taras Shevchenko University. 2009. No. 19, pp. 44-48.
8. Koshevoy N.D., Kostenko E.M. Optimal planning of the experiment for the study of dynamic objects. Collection of Military Institute of Kiev National Taras Shevchenko University. 2009. No. 20, pp. 57-62.
9. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Zabolotny A.V. Optimal planning of the experiment investigating a device for quality control of dielectric materials. ACS and automation devices. 2009. No. 147, pp. 38-41.
10. 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.
11. Koshevoy N.D., Chuiko A.S. Application of ant algorithms to optimize factorial experimental designs. Mathematical modeling. 2013. No. 1, pp. 92-97.

prof. Koshevoy N.D., Malkova A.V.

## APPLICATION OF THE GRAVITY SEARCH METHOD TO MINIMIZE THE COST OF CONDUCTING A MULTIFACTOR EXPERIMENT

*Experimental research methods are increasingly used in industry in the optimization of production processes. Experiments, as a rule, are multifactorial and are connected with optimization of quality of materials, search of optimum conditions of carrying out technological processes, development of the most rational designs of the equipment, etc. The use of experimental planning makes the behavior of the experimenter purposeful and organized, significantly increases productivity and reliability of the results. An important advantage is its versatility, suitability in the vast majority of research areas.*

*When implementing an industrial experiment, the main task is to obtain the maximum amount of useful information about the influence of individual factors of the production process, provided that the minimum number of expensive observations in the shortest period of time. Therefore, it is important to increase the efficiency of experimental research with minimal time and cost. For this purpose, it is expedient to develop systems of automation of experiments which will allow to reduce terms of carrying out experimental researches and to reduce expenses for them. Object of research: processes of optimization of plans of multifactor experiment on cost and time expenses. Subject of research: an optimization method developed on the basis of the gravitational search algorithm, which consists in comparing the force of gravity (cost) of the first row of the planning matrix of the experiment to the next rows of the matrix.*

*In the study of photoelectric transducers of angular displacements, the efficiency and effectiveness of the gravitational search method were analyzed in comparison with previously developed methods: analysis of line permutations, particle swarm, taboo search. The cost of carrying out the experiment plan and the efficiency for solving optimization problems in comparison with the original plan and the implementation of the above methods are shown.*

*Keywords: gravitational search, experimental plan, planning matrix, optimal plan, optimization, cost, comparative characteristics, cost benefit.*