

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗОЗУЛИНОГО ПОШУКУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

*Методи планування експериментів, оптимізації і прогнозування набувають все більшого значення при постановці досліджень, спрямованих на вивчення складних технологічних процесів. Планування експериментів передбачає включення в практику інженерних досліджень способів, що дозволяють збільшувати ефективність робіт. На відміну від найбільш поширеного однофакторного методу дослідження, коли вивчається дія кожного чинника окремо, існують методи, що дозволяють при дослідженні складних процесів виконувати експерименти так, щоб варіювати всі фактори відразу. Це сприяє підвищенню ефективності експерименту, що виражається в тому, що цікавіші експериментатора параметри визначаються зі значно меншою помилкою, ніж при традиційних методах дослідження. При цьому з підвищенням числа факторів підвищується точність експерименту. Багато методів, розроблені стосовно до планування експериментів, сприяють прийняттю оптимальних рішень на різних стадіях дослідницької роботи. Але вони дають позитивний результат при маленькому значенні числа факторів, тому як з підвищенням числа факторів зростає значення різних комбінацій перестановок. Проведення експериментів вимагає, певних фінансових і часових витрат. Тому одне із завдань оптимізації планування експериментів мінімізувати витрати на проведення планів експериментів, при цьому отримати максимальну кількість інформації про вплив обраних факторів на технологічний процес. Метою даної статті є розробка методу та програмного забезпечення для оптимізації планів багатофакторних експериментів, які зменшать часові та фінансові витрати на проведення багатофакторних планів експериментів. Був розроблений алгоритм, який реалізовано програмно, на мові програмування С#, для оптимізації планів багатофакторних експериментів з використанням методу зозулиного пошуку. Працездатність розробленого алгоритму перевірялася на оптимізації планів багатофакторних експериментів технологічних процесів. Проведено порівняльний аналіз методів синтезу оптимальних за вартісними і часовими витратами планів повного факторного експерименту і показана ефективність методу зозулиного пошуку.*

*Ключові слова:* планування експерименту, зозулин пошук, оптимізація, алгоритм, метод.

**Постановка проблеми.** При дослідженні різних процесів виникає проблема оптимізації експерименту, щоб він був, як можна дешевше і при цьому було витрачено, як можна менше часу. На вартість реалізації експерименту істотно впливає порядок проведення дослідів. Тому отримавши оптимальний план черговості проведення дослідів, сам процес проведення експерименту буде відбуватися швидше, а витрати на його реалізацію будуть істотно нижче. Виникає проблема отримання методу, який буде знаходити оптимальний план черговості проведення дослідів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі методи синтезу оптимальних за вартісними і часовими витратами планів дробових і повного факторних експериментів, засновані на використанні таких методів оптимізації: аналізу перестановок [1], випадкового пошуку [1], метод гілок та меж [1], класичний (КГА) і клітинний генетичні алгоритми [2], жадібний алгоритм [3], метод вкладених розбиттів [4], мурашиний алгоритм [5], метод штучних бджолиних колоній [6], метод імітації відпалу [7], роя частинок [8]. При дослідженні різних технологічних процесів, систем та об'єктів було доведено що використання цих методів є ефективним [1-10]. Планування експериментів активно використовується в різних галузях [1-15]. Доведено, що для об'єктів з кількістю факторів  $k \leq 3$  характерний збіг оптимальних планів, отриманих методом аналізу перестановок і методом гілок і меж [1]. При оптимізації багатофакторних планів експерименту з кількістю факторів  $k > 3$  результати виходять наближені. Тому зважаючи на це, доцільно перевірити оптимальність багатофакторних планів, отрима-

них цими методами, застосувавши розроблений метод на основі алгоритму зозулиного пошуку.

**Мета статті.** Розробити методу для оптимізації багатофакторних планів експериментів алгоритмом зозулиного пошуку, довести ефективність його застосування, провести порівняльний аналіз цього методу з іншими. Реалізувати розроблений алгоритм, що реалізує цей метод програмно.

**Основні результати досліджень.**

Розроблено метод, алгоритм і програмне забезпечення оптимізації пошуку оптимальних багатофакторних планів експериментів методом зозулиним пошуком.

Сутність алгоритму полягає в наступному.

**Крок 1.** На початку роботи алгоритму виконується введення кількості факторів досліджуваного об'єкта  $k$ .

**Крок 2.** Залежно від кількості факторів та експериментів виконується формування матриць початкових даних, планування експериментів та вартості переходів між рівнями для кожного фактору.

**Крок 3.** Користувач вводить початкові дані та дані плану експериментів.

**Крок 4.** Користувач вводить вартості переходів між рівнями для кожного фактора.

**Крок 5.** Виконується формування кількості масивів відповідно до кількості рядків.

**Крок 6.** Пошук вартості переходів з заданих початкових умов, для кожного масиву, масив з  $n/n$  переходів вибиває з розрахунків.

**Крок 7.** Випадковим чином виконується пошук наступного рядка, якщо рядок має більше одного переходу, виконується новий пошук, як тільки рядок буде знайдено виконується розрахунок вартості переходу, якщо рядка з одним переходом не має, масив вибиває з розрахунків.

**Крок 8.** Якщо розрахунки скінчились, тоді переходимо до кроку 9. Якщо розрахунки не скінчились, тоді переходимо до кроку 7.

**Крок 9.** Якщо жодного оптимального масиву не знайдено, переходимо до кроку 6. Якщо більше одного, обирається масив з найменшою сумою вартості переходів.

**Крок 10.** Підсумовування вартості рядків початкового плану експерименту. Підсумовування вартості рядків оптимального плану експерименту та виведення на екран.

**Крок 11.** Знаходження коефіцієнта зменшення вартості експериментів та виведення розрахунку на екран.

Працездатність розробленого алгоритму, що реалізовано на основі методу зозулиного пошуку для оптимізації багатофакторних планів експериментів, перевірялась на практиці у порівнянні з методами аналізу перестановок [1], класичним генетичним алгоритмом [2], випадкового пошуку [1], методом вкладених розбиттів [4], алгоритмом штучних бджолиних колоній [6].

Ефективність програмного забезпечення перевірялася на прикладах таких технологічних процесів (ТП):

1) процес вимірювання густини струму гальванічних ванн з використанням мірних датчиків [1];

2) точності пристрою для контролю якості діелектричних матеріалів [14];

3) оптимізації параметрів нерівномірності покриття провідників гальванічними опадами [15].

Порівняння результатів представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння результатів отриманих в ході оптимізації планів багатofакторних експериментів за вартісним показником

Технологічний процес	Метод	Вартість реалізації початкового плану експерименту, ум.од.	Оптимізована вартість, ум.од.	Виграш по вартості реалізації, раз
Приклад 1	Класичний ГА	174	64	2,72
	Випадковий пошук		110	1,58
	Аналіз перестановок		147	1,2
	Метод вкладених розбитків		64	2,7
	Алгоритм штучних бджолиних колоній		60	2,9
	Метод зозулиного пошуку		60	2,9
Приклад 2	Класичний ГА	72,2	25,8	2,8
	Випадковий пошук		41,8	1,7
	Аналіз перестановок		30,5	2,4
	Метод вкладених розбитків		25,8	2,8
	Алгоритм штучних бджолиних колоній		25,8	2,8
	Метод зозулиного пошуку		21,99	3,28
Приклад 3	Класичний ГА	24,7	16,1	1,5
	Випадковий пошук		23,4	1,1
	Аналіз перестановок		19,1	1,3
	Метод вкладених розбитків		16,1	1,5
	Алгоритм штучних бджолиних колоній		16,1	1,5
	Метод зозулиного пошуку		12	2,06

Графік порівняння виграшів отриманих в ході оптимізації планів багатofакторних експериментів за вартісним показником представлено на рисунку 1.

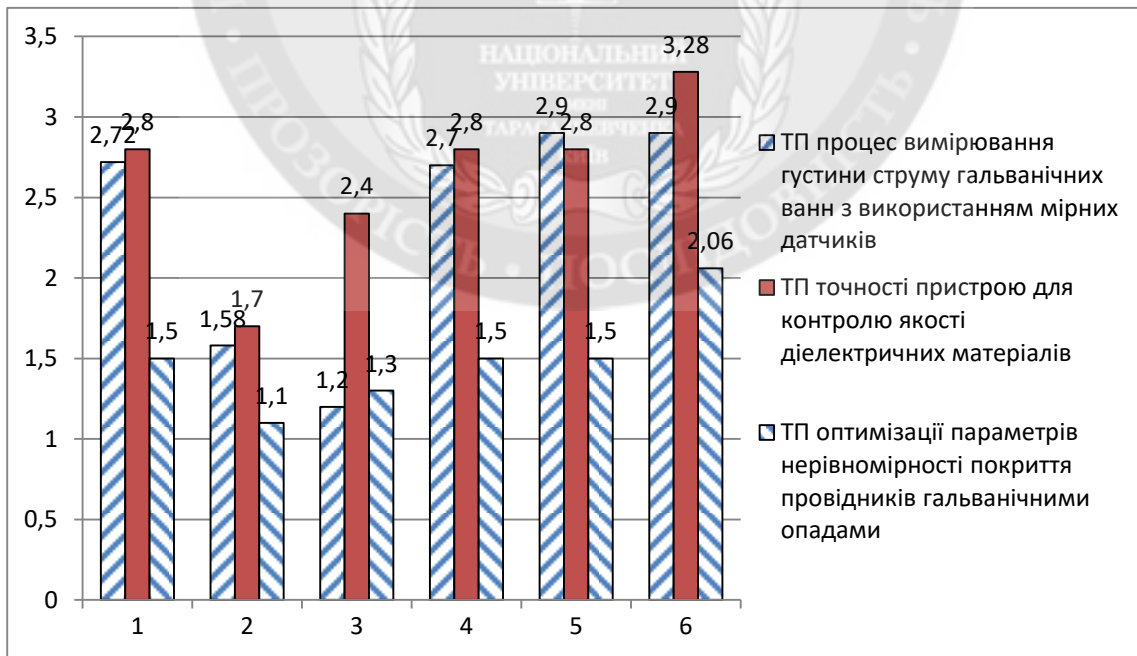


Рисунок 1 – Графік порівняння виграшів отриманих в ході оптимізації планів багатofакторних експериментів

Для більш наочного уявлення про отримані результати, їх було поділено на результати кожного методу: 1) класичний ГА; 2) випадковий пошук; 3) аналіз перестановок; 4) метод вкладених розбитків; 5) алгоритм штучних бджолиних колоній; 6) метод зозулиного пошуку.

На пошук оптимальних багатофакторних планів експериментів методом зозулиного пошуку було витрачено 0,01 с програмного часу, без урахування часу вводу початкових даних, для кожного технологічного процесу (ТП), що досліджувались.

**Висновки.** Розроблено метод і алгоритм, що реалізує оптимізацію за вартісними (часовими) витратами багатофакторних планів експериментів зозулиним пошуком. На основі цього алгоритму було написано програмне забезпечення на мові програмування C#. На прикладах різних технологічних процесів доведена працездатність та ефективність розробленого алгоритму та програмного забезпечення. Отримані результати, стосовно зменшення вартості, оптимальні або наближені до оптимальних. Також з отриманих результатів було з'ясовано, що створений алгоритм на основі зозулиного пошуку доцільно використовувати при кількості факторів від 2 до 5. На пошук оптимальних багатофакторних планів експериментів методом зозулиного пошуку було витрачено 0,01 с програмного часу, що свідчить про можливість отримання оптимального або наближеного до оптимального плану багатофакторних експериментів за короткий проміжок часу.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента. Полтава: издатель Шевченко Р.В., 2013. 317 с.
2. Кошевой Н. Д., Сухобрус Е. А. Оптимальное планирование эксперимента с использованием генетических алгоритмов. Математичне моделювання. 2013. № 2(29). С. 36-40.
3. Кошевой Н.Д., Бельмега А.В. Применение жадного алгоритма для оптимизации многофакторных экспериментов. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. 2014. Вип. 47. С. 29-37.
4. Кошевой Н.Д., Стадник А.С. Оптимальное планирование эксперимента в условиях ограниченных ресурсов. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. 2017. Вип. 54. С. 230-235.
5. Кошевой Н.Д., Чуйко А.С. Оптимизация планов экспериментов с использованием алгоритма муравьиной системы. Метрологія та прилади. 2013. Вип. №2. П(40). С. 135-137.
6. Кошевой Н.Д., Стадник А.С. Оптимальное планирование эксперимента на основе алгоритма искусственных пчелиных колоний. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. 2017. Вип. 58. С. 19-24.
7. Кошевой Н.Д., Бельмега А.В. Применение алгоритма имитации отжига для оптимизации многофакторных планов эксперимента. Системи обробки інформації. 2015. Вип. 6(131). С. 103-106.
8. Кошевой Н.Д., Беляева А.А. Применение алгоритма оптимизации роём частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2018. Вип. №1. С. 41 – 49.
9. Koshevoy, V.A. Gordienko, Ye.A. Sukhobrus. Optimization for the Design matrix realization value with the aim to investigate technological processes. Telecommunications and Radio Engineering. 2014. vol.73. №15. p. 1383-1386
10. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Павлик А.В. Методология оптимального по стоимостным и временным затратам планирования эксперимента: монографія. Полтава: Полтавская государственная аграрная академия, 2017. 232 с.
11. Virgil L. A., McLean R. A. Design of Experiments: A Realistic Approach: book. Abingdon: Routledge, 2018. 440 P.
12. Heath R., Andrew K., James W. Design and Analysis of Experiments by Douglas Montgomery: A Supplement for Using JMP: book. North Carolina: SAS Institute, 2014. 302 P.
13. Silva V. Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes: book. Norderstedt: BoD – Books on Demand, 2018. 180 P.
14. Кошевой Н. Д., Костенко Е.М., Заболотный А.В. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. 2009. Вип. 147. С. 38-42.

15. Кошевой Н.Д., Бестань С.Г., Кожевников Г.К., Кошевой О.Н., Доценко Н.В. Экспериментальное исследование, моделирование и оптимизация процесса гальванического меднения печатных плат. Математическое моделирование. 2001. № 1. С. 28-30.

#### REFERENCES:

1. Koshevoy, N.D. and Kostenko, Ye.M. (2013) Optimal'noye po stoimostnym i vremennym zatratam planirovaniye eksperimenta. Poltava: izdatel' Shevchenko R.V.. – 317 P.
2. Koshevoy, N.D. and Sukhobrus, Ye. A. (2013) Optimal'noye planirovaniye eksperimenta s ispol'zovaniyem geneticheskikh algoritmov. Matematichne modelyuvannya. № 2(29). P. 36-40.
3. Koshevoy, N.D. and Bel'mega, A.V. (2014) Primeneniye zhadnogo algoritma dlya optimizatsii mnogofaktornykh eksperimentov. Zbírnik naukovikh prats' Víys'kovogo ínstytutu Kiívs'kogo natsíonal'nogo uníversitetu ím. Tarasa Shevchenka. № 47. P. 29-37.
4. Koshevoy, N.D. and Stadnik, A.S. (2017) Optimal planning of the experiment in the conditions of limited resources. Zbírnik naukovikh prats' Víys'kovogo ínstytutu Kiívs'kogo natsíonal'nogo uníversitetu ím. Tarasa Shevchenka. № 54. P. 230-235.
5. Koshevoy, N.D. and Chuiko, A.S. (2013) Optimization of experiment plans using the algorithm of the ant system. Metrology and devices. №2. II (40). P. 135-137.
6. Koshevoy, N.D. and Stadnik, A.S. (2017) Optimal planning of experiment on the basis of algorithm of artificial bicolonic colonies. Zbírnik naukovikh prats' Víys'kovogo ínstytutu Kiívs'kogo natsíonal'nogo uníversitetu ím. Tarasa Shevchenka. № 58. P. 19-24.
7. Koshevoy, N.D. and Bel'mega, A.V. (2015) Primeneniye algoritma imitatsii otzhiga dlya optimizatsii mnogofaktornykh planov eksperimenta. Sistemi obrobki ínformatsíi. № 6(131). P. 103-106.
8. Koshevoi, N.D. and Belyaeva, A.A. (2018) Application of an algorithm for optimizing the swarm of particles to minimize the cost of conducting a multifactorial experiment. RadioElectronics, Informatics, Management. №1. P. 41.
9. Koshevoy, N.D., Gordienko, V.A. and Sukhobrus, Ye.A. (2014) Optimization for the Design matrix realization value with the aim to investigate technological processes. Telecommunications and Radio Engineering. vol.73. №15. p. 1383-1386
10. Koshevoy, N.D., Kostenko, E.M. and Pavlik, A.V. (2017) The methodology of the optimal planning for the cost and time of experiment planning: monograph. Poltava: Poltava State Agrarian Academy. 232 p.
11. Virgil, L. A. and McLean, R. A. Design of Experiments: A Realistic Approach: book. Abingdon: Routledge, 2018. 440 P.
12. Heath, R., Andrew, K. and James, W. Design and Analysis of Experiments by Douglas Montgomery: A Supplement for Using JMP: book . North Carolina: SAS Institute, 2014. 302 P.
13. Silva, V. Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes: book. Norderstedt: BoD – Books on Demand, 2018. 180 P.
14. Koshevoy, N.D., Kostenko, Ye.M. and Zabolotnyy, A.V. (2009) Optimal'noye planirovaniye eksperimenta pri issledovanii ustroystva dlya kontrolya kachestva dielektricheskikh materialov. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i pribory avtomatiki. № 147. P. 38-42.
15. Koshevoy, N.D., Bestan, S.G., Kozhevnikov, G.K., Koshevoy, O.N. and Dotsenko, N.V. (2001) Eksperimental'noye issledovaniye, modelirovaniye i optimizatsiya protsessa gal'vanicheskogo medneniya pechatnikh plat. Matematicheskoye modelirovaniye. № 1. P. 28-30.

д.т.н., проф. Кошевой Н.Д., Лебедев Н.С.

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КУКУШКИНОГО ПОИСКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

*Методы планирования экспериментов, оптимизации и прогнозирования приобретают все большее значение при постановке исследований, направленных на изучение сложных технологических процессов. Планирование экспериментов предполагает включение в практику инженерных исследований способов, позволяющих увеличивать эффективность работ. В отличие от наиболее распространенного однофакторного метода исследования, когда изучается действие каждого фактора в отдельности, существуют методы, позволяющие при исследовании сложных процессов выполнять эксперименты так, чтобы варьировать всеми факторами сразу. Это способствует повышению эффективности эксперимента, выражается в том, что интересующие экспериментатора параметры определяются со значительно меньшей ошибкой, чем при*

традиционных методах исследования. При этом с увеличением числа факторов повышается точность эксперимента. Многие методы, разработанные применительно к планированию экспериментов, принятию оптимальных решений в различных стадиях исследовательской работы. Но они дают положительный результат при небольшом значении числа факторов, потому как с увеличением числа факторов возрастает значение различных комбинаций перестановок. Проведение экспериментов требует, определенных финансовых и временных затрат. Поэтому одна из задач оптимизации планирования экспериментов минимизировать затраты на проведение планов экспериментов, при этом получить максимальное количество информации о влиянии интересующих факторов на технологический процесс. Целью данной статьи является разработка метода и программного обеспечения для оптимизации планов многофакторных экспериментов, который уменьшит временные и финансовые затраты на проведение многофакторных планов экспериментов. Был разработан алгоритм, который реализован программно, на языке программирования C#, для оптимизации планов многофакторных экспериментов с использованием метода кукушкиного поиска. Работоспособность разработанного алгоритма проверялась на оптимизации планов многофакторных экспериментов технологических процессов. Проведен сравнительный анализ методов синтеза оптимальных по стоимостным затратам планов много факторного эксперимента и показана эффективность метода кукушкиного поиска.

*Ключевые слова:* планирование эксперимент, кукушкин поиск, оптимизация, алгоритм, метод.

Prof. Koshovyi M.D., Liebidiev M.S.

#### APPLICATION OF THE KUKHUSKIN SEARCH METHOD FOR OPTIMIZATION OF PLANS OF MULTIFACTOR EXPERIMENTS

*The methods of experiment planning, optimization, and forecasting are becoming increasingly important in the setting up of studies aimed at studying complex technological processes. The design of experiments involves the incorporation into practice of engineering research of methods to increase the efficiency of work. Unlike the most common one-factor research method, when the effect of each factor is studied separately, there are methods that allow performing experiments in order to study complex processes so that they vary by all factors at once. This helps to increase the efficiency of the experiment, expressed in the fact that the parameters of interest to the experimenter are determined with a significantly smaller error than with traditional research methods. Moreover, with an increase in the number of factors, the accuracy of the experiment increases. Many methods developed in relation to the planning of experiments, making optimal decisions at various stages of research work. But they give a positive result with a small value of the number of factors, because as the number of factors increases, the value of various combinations of permutations increases. Conducting experiments requires certain financial and time costs. Therefore, one of the tasks of optimizing experimental design is to minimize the costs of conducting experimental designs, while obtaining the maximum amount of information about the influence of factors of interest on the process. The purpose of this article is to develop a method and software for optimizing multi-factor experiment designs, which will reduce the time and financial costs of conducting multi-factor experiment designs. An algorithm was developed, which is implemented programmatically, in the C # programming language, to optimize plans for multifactor experiments using the cuckoo search method. The efficiency of the developed algorithm was tested on the optimization of plans for multifactor experiments of technological processes. A comparative analysis of the methods of synthesis of cost-optimal plans of a multi-factor experiment is carried out and the effectiveness of the cuckoo search method is shown.*

*Keywords:* experiment planning, cuckoo search, optimization, algorithm, method.