

**ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ МАВПЯЧОГО ПОШУКУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ**

*Експериментальні методи дослідження все більше застосовують для оптимізації технологічних процесів. Однією з найголовніших цілей експерименту є отримання максимальної кількості об'єктивної інформації про вплив досліджуваних факторів на технологічний процес, при проведенні найменшого числа дорогих дослідів. Планування експерименту використовується для одержання математичної моделі при мінімальних вартісних і часових витратах. Задача знаходження мінімальної вартості проведення експерименту є NP-важкою, і точне рішення можна знайти тільки для невеликої кількості факторів. Для кількості факторів  $k > 4$  число перестановок різко збільшується і на сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки точно вирішити задачу неможливо. Для поліпшення техніко-економічних показників пристроїв та систем також слід виконувати експериментальні дослідження, спрямовані на отримання їх математичних моделей. Надалі з використанням математичної моделі визначаються оптимальні параметри конструкції, що забезпечують мінімальну похибку вимірювання пристрою, який розробляється. У зв'язку з цим стає актуальним розробка і дослідження наближених алгоритмів. На кафедрі авіаційних приладів і вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» розроблена методологія оптимального за вартісними і часовими витратами планування експерименту, що включає такі методи: аналіз перестановок, метод послідовного наближення, метод гілок и меж, випадковий пошук, симплекс-метод, мурашиний алгоритм, генетичний алгоритм, метод відпалу, жадібний алгоритм, рій частинок. Ведуться подальші дослідження з вибору кращих методів оптимізації повного факторного експерименту. Метою даної статті є розробка методу та програмного забезпечення для оптимізації планів повного факторного експерименту з використанням алгоритму мавпячого пошуку. Були розроблені метод і програма на мові програмування C++ для оптимізації планів повного факторного експерименту з використанням алгоритму мавпячого пошуку. Працездатність методу була перевірена на ряді таких технологічних об'єктів: витрата палива в двигуні внутрішнього згорання, зварювання пластин малої товщини, виготовлення деталей гарячої штампуванням, а також процесу обслуговування машин з числовим програмним управлінням. Проведено порівняльний аналіз методів синтезу оптимальних за вартісними і часовими витратами планів повного факторного експерименту і показана ефективність методу мавпячого пошуку.*

*Ключові слова: алгоритм, метод, оптимальний план, мавпячий пошук, оптимізація, планування експерименту, вартість, виграш.*

**Постановка проблеми.** Експериментальні методи дослідження все більше застосовують для оптимізації технологічних процесів. Однією з найголовніших цілей експерименту є отримання максимальної кількості об'єктивної інформації про вплив досліджуваних факторів на технологічний процес, при проведенні найменшого числа дорогих дослідів. Планування експерименту використовується для одержання математичної моделі при мінімальних вартісних і часових витратах. Задача знаходження мінімальної вартості проведення експерименту є NP-важкою, і точне рішення можна знайти тільки для невеликої кількості факторів. Для кількості факторів  $k > 4$  число перестановок різко збільшується і на сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки точно вирішити задачу неможливо. Для поліпшення техніко-економічних показників пристроїв та систем також слід виконувати експериментальні дослідження, спрямовані на отримання їх математичних моделей. Надалі з використанням математичної моделі визначаються оптимальні параметри конструкції, що забезпечують мінімальну похибку вимірювання пристрою, який розробляється. У зв'язку з цим стає актуальним розробка і дослідження наближених алгоритмів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі комбінаторні методи оптимізації [1 - 3], але вони не застосовуються для побудови оптимальних за вартісними і часовими витратами планів багатофакторних експериментів. Відомі приклади побудови багатофакторних планів експериментів, які засновані на використанні таких методів оптимізації: аналіз перестановок [4]; метод послідовного наближення [4]; метод гілок і меж [4]; випадковий пошук (перестановка рядків матриці планування) [4]; симплекс-метод [5]; мурашиний алгоритм [6]; генетичний алгоритм [7]; метод відпалу [8]; жадібний алгоритм [9], рій частинок [10]. Ефективність використання методів показана також при дослідженні різних об'єктів - технологічних процесів, приладів і систем [4, 11 - 14]. Всі ці методи мають як переваги, так і недоліки. Наприклад, при великій кількості факторів для повного перебору всіх рядків матриці планування потрібно багато часу, а інші алгоритми дозволяють отримати оптимальний план експерименту для обмеженого числа факторів  $k$ . При великій кількості факторів результати оптимізації виходять наближеними до оптимального плану експерименту. Зважаючи на це, доцільно для порівняння результатів застосувати метод мавпячого пошуку.

**Мета роботи** – розробка методу та програмного забезпечення для оптимізації планів повного факторного експерименту з використанням алгоритму мавпячого пошуку.

**Основний матеріал досліджень.** Розроблені метод і програмне забезпечення оптимізації планів повного факторного експерименту за вартісними та часовими витратами з використанням алгоритму мавпячого пошуку.

Сутність застосування методу мавпячого пошуку полягає в наступному.

Крок 1. На початку роботи алгоритму вводиться кількість факторів  $k$ .

Крок 2. Введення вартостей переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 3. У залежності від вибраної кількості факторів будується матриця планування експерименту.

Крок 4. Обчислення початкової вартості проведення експерименту.

Крок 5. Генерація матриці сум вартостей переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 6. Сортування індексів і генерація масиву індексів для сум вартостей переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 7. Перестановка в стовпцях відповідно до масиву індексів для сум вартостей переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 8. Виконання перебору між усіма блоками стовпців (гілок дерева, за яким переміщається агент (мавпа)). Кількість блоків в стовпцях (гілок на дереві), по якому переміщається агент (мавпа), визначається за формулою  $N_{\text{блоків}} = 2N$ , де  $N$  – номер стовпця.

Крок 9. Визначення початкової точки для подальшого перебору, виходячи з найменшої суми вартостей переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 10. Виконання пошуку в рамках блоку стовпця, в якому знаходиться агент за мінімальним значенням суми вартостей переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 11. Перехід на наступний елемент матриці планування і порівняння з попереднім елементом. Здійснюється пошук в блоці стовпця з найменшим значенням суми переходів між рівнями і встановлення відповідного блоку (перестановка місцями в матриці планування експерименту).

Крок 12. Побудова оптимальної матриці планування експерименту.

Крок 13. Обчислення загальної вартості реалізації експерименту.

Крок 14. Обчислення величини виграшу  $V$  як відношення початкової вартості проведення експерименту  $C_{\text{поч}}$  до вартості проведення експерименту  $C_{\text{min}}$ .

Крок 15. Обчислення часу  $t$ , витраченого на оптимізацію плану повного факторного експерименту з використанням алгоритму мавпячого пошуку.

Програмне забезпечення реалізовано на мові програмування C++. Необхідний обсяг пам'яті для реалізації програми методу мавпячого пошуку, становить 46,7 МБ. Таким

чином, реалізація методу мавпячого пошуку вимагає невеликий обсяг пам'яті ЕОМ і має високу швидкодію рішення задачі.

Перевірка працездатності розробленого методу та програмного забезпечення для оптимізації планів повного факторного експерименту здійснювалася на ряді практичних задач.

Проводилось дослідження системи для визначення витрати палива в двигунах внутрішнього згорання. При цьому як критерій оптимізації розглядалася витрата палива  $q$  в мілілітрах. Факторами, які впливають на цей показник було обрано:  $X_1$  - кількість оборотів  $n$  двигуна в хвилину, об / хв;  $X_2$  - температура  $T$  двигуна, °С [4].

Вартості зміни значень рівнів факторів наведені в табл. 1 [4].

Початковий план повного факторного експерименту ( $k = 2$ ) і оптимальний за вартістю реалізації план експерименту, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку, наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Вартості зміни значень рівнів факторів

Вартості зміни значень рівнів факторів, ум. од.	Позначення факторів	
	$X_1$	$X_2$
з «-1» в «+1»	0,32	0,16
з «+1» в «-1»	0,22	0,48

Таблиця 2

Початковий план повного факторного експерименту і оптимальний, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку

Початковий план			Оптимальний план		
Номер експерименту	Позначення факторів		Номер експерименту	Позначення факторів	
	$X_1$	$X_2$		$X_1$	$X_2$
1	-1	-1	2	+1	-1
2	+1	-1	1	-1	-1
3	-1	+1	3	+1	+1
4	+1	+1	4	-1	+1

Вартість оптимального плану експерименту, отриманого методом мавпячого пошуку, становить 0,7 ум. од., а вартість плану, отриманого методом повного перебору, також становить 0,7 ум. од. [4].

Пошук оптимального плану експерименту ( $k = 2$ ), отриманого методом мавпячого пошуку, був реалізований за 0,001 с.

Виграш у порівнянні з початковою матрицею планування експерименту становить 1,46 раз, в роботі [4] виграш також становить 1,46 раз.

Проводилось дослідження технологічного процесу зварювання пластин малої товщини, в якому проведено експеримент по визначенню оптимального режиму точкового зварювання пластин малої товщини. Як фактори розглядалися:  $X_1$  - ємність конденсаторів, мкФ;  $X_2$  - коефіцієнт трансформації,  $X_3$  - зусилля на електродах, Н [11].

Вартості зміни значень рівнів факторів наведені в табл. 3 [11].

Початковий план повного факторного експерименту ( $k = 3$ ) і оптимальний за вартістю реалізації план експерименту, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку, наведені в табл. 4.

Таблиця 3

## Вартості зміни значень рівнів факторів

Вартості зміни значень рівнів факторів, ум. од.	Позначення факторів		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
з «-1» в «+1»	2,5	2,0	1,5
з «+1» в «-1»	3,0	2,5	2,0

Таблиця 4

Початковий план повного факторного експерименту і оптимальний, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку

Початковий план				Оптимальний план			
Номер експерименту	Позначення факторів			Номер експерименту	Позначення факторів		
	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	5	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	3	-1	+1	-1
5	-1	-1	+1	4	+1	+1	-1
6	+1	-1	+1	8	+1	+1	+1
7	-1	+1	+1	6	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	2	+1	-1	-1

Вартість оптимального плану експерименту, отриманого методом мавпячого пошуку, становить 14 ум. од., а вартість плану, отриманого методом повного перебору, також становить 14 ум. од. [11].

Пошук оптимального плану експерименту ( $k = 3$ ) методом мавпячого пошуку був реалізований за 0,03 с.

Виграш у порівнянні з початковою матрицею планування становить 1,93 раза, а в роботі [11] виграш також становить 1,93 раза.

Проводилось дослідження технологічного процесу виготовлення деталей гарячим штампуванням. На підставі апріорної інформації в якості критерію оптимізації процесу була обрана товщина деталі  $h_{дет}$ , а домінуючими - такі фактори: X<sub>1</sub> - температура нагріву заготовки, °C; X<sub>2</sub> - час нагрівання заготовки, хв; X<sub>3</sub> - температура нагріву штампа, °C [4].

Часи зміни значень рівнів факторів наведені в табл. 5 [4].

Початковий план повного факторного експерименту ( $k = 3$ ) і оптимальний за часом реалізації план експерименту, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку, наведені в табл. 6.

Таблиця 5

## Часи зміни значень рівнів факторів

Часи зміни значень рівнів факторів, хв	Позначення факторів		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
з «-1» в «+1»	30	22	3,75
з «+1» в «-1»	25	5	7,5

Таблиця 6

Початковий план повного факторного експерименту і оптимальний, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку

Початковий план				Оптимальний план			
Номер експерименту	Позначення факторів			Номер експерименту	Обозначение факторов		
	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	4	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	8	+1	+1	+1
3	-1	+1	-1	6	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	2	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	1	-1	-1	-1
6	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1
7	-1	+1	+1	7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1	3	-1	+1	-1

Час реалізації експерименту, отриманого методом мавпячого пошуку, становить 74,5 хв, а час за планом, отриманим методом повного перебору, становить 72 хв [4].

Пошук оптимального плану експерименту ( $k = 3$ ) методом мавпячого пошуку був реалізований за 0,01 с.

Виграш у порівнянні з початковою матрицею планування становить 3,33 раза, в роботі [4] виграш становить 3,37 раза.

Проведено дослідження ділянки цеху верстатів з числовим програмним управлінням. В якості критерію оптимізації було вибрано сумарний час роботи верстатів з числовим програмним управлінням. Домінуючими чинниками, які впливають на цей показник, були обрані: X<sub>1</sub> - час виконання профілактики t<sub>n</sub>, годин; X<sub>2</sub> - число у<sub>ц</sub> верстатів з числовим програмним управлінням; X<sub>3</sub> - час роботи верстатів протягом доби t<sub>c</sub>, годин; X<sub>4</sub> - періодичність профілактики t<sub>0</sub>, годин [4].

Часи зміни значень рівнів факторів наведені в табл. 7 [4].

Початковий план повного факторного експерименту ( $k = 4$ ) і оптимальний за часом реалізації план експерименту, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку, наведені в табл. 8.

Таблиця 7

Часи зміни значень рівнів факторів

Часи зміни значень рівнів факторів, хв	Позначення факторів			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
з «-1» в «+1»	7,0	6,0	16,0	100,0
з «+1» в «-1»	3,0	2,0	12,0	50,0



Таблиця 8

Початковий план повного факторного експерименту і оптимальний, розроблений за допомогою методу мавпячого пошуку

Початковий план					Оптимальний план				
Номер експерименту	Позначення факторів				Номер експерименту	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
1	-1	-1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	14	+1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	13	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	11	-1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	9	-1	-1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	-1	+1
9	-1	-1	-1	+1	4	+1	+1	-1	-1
10	+1	-1	-1	+1	2	+1	-1	-1	-1
11	-1	+1	-1	+1	1	-1	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	3	-1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	7	-1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	8	+1	+1	+1	-1

Час реалізації оптимального плану експерименту, отриманого методом мавпячого пошуку, становить 80 годин.

Знаходження оптимального плану експерименту ( $k = 4$ ) методом мавпячого пошуку було реалізовано за 0,017 с.

Виграш у порівнянні з початковою матрицею планування експерименту становить 3,14 рази, а в роботі [4] виграш, отриманий методом обмеженого перебору, становить 1,17 рази.

Таким чином, в результаті дослідження обраних об'єктів показано, що метод мавпячого пошуку дає результати близькі до оптимальних або оптимальні як в методі повного перебору, але за менший час завдяки зменшенню необхідних перетворень.

**Висновки.** Розроблені метод і програма, що реалізують оптимізацію планів повного факторного експерименту з застосуванням алгоритму мавпячого пошуку. Доведено їх працездатність і ефективність на ряді прикладів дослідження систем і технологічних процесів. Також метод мавпячого пошуку можна ефективно використовувати для оптимізації планів експерименту при дослідженні різних об'єктів.

Пошук оптимального або близького до оптимального плану, отриманого цим методом, реалізується за низький час розрахунку. Показано, що для оптимізації планів повного факторного експерименту доцільно використання методу мавпячого пошуку при дослідженні об'єктів з кількістю факторів  $2 \leq k \leq 7$ .

Наукову новизну представляє запропонований метод мавпячого пошуку оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів повного факторного експерименту, а практичну цінність - програмне забезпечення для його реалізації.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Hoskins, D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing [Text] / D. S. Hoskins // Applied Optimal Designs. – 2007. – No. 4. – P. 147-179.
2. Morgan, J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics [Text] / J. P. Morgan // Journal of the American Statistical Association. – 2005. – Vol.100. - №. 471. – P. 1092- 1093.
3. Bailey, R. A. Combinatorics of optimal designs [Text] / R. A. Bailey, P. G. Cameron // Surveys in Combinatorics. – 2009. – Vol. 365. – P. 19-73.
4. Кошевой Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента: монография /Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко. – Полтава: издатель Шевченко Р.В., 2013. – 317с.
5. Кошевой Н.Д. Оптимальное планирование эксперимента на основе симплекс-метода / Н.Д. Кошевой, Е.А. Сухобрус // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: Дніпродзержинський державний технічний університет, 2012. – Вип. 1 (26). – С. 27-30.
6. Кошевой Н.Д. Оптимизация планов экспериментов с использованием алгоритма муравьиной системы / Н.Д. Кошевой, А.С. Чуйко // Метрологія та прилади, 2013. – №2. II(40). - С. 135-137.
7. Кошевой Н.Д. Оптимальное планирование эксперимента с использованием генетических алгоритмов / Н.Д. Кошевой, Е.А. Сухобрус // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: Дніпродзержинський державний технічний університет, 2013. – Вип. 2(29). – С. 36-40.
8. Кошевой Н.Д. Применение алгоритма имитации отжига для оптимизации многофакторных планов эксперимента / Н.Д. Кошевой, А.В. Бельмега, З.Э. Чистикова // Системы обработки информации. - X: ХУПС ім. Івана Кожедуба. – 2015. – Вип.6(131). – С. 103-106.
9. Кошевой Н.Д. Применение жадного алгоритма для оптимизации многофакторных экспериментов / Н.Д. Кошевой, А.В. Бельмега // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ. – 2014. – Вип. 47. – С. 29-37.
10. Кошевой Н.Д. Применение алгоритма оптимизации роєм частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента / Н.Д. Кошевой, А.А. Беляева // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. - №1. – С. 41 – 49.
11. Методология оптимального по стоимостным и временным затратам планирования эксперимента: монография / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.В. Павлик и др. – Полтава: Полтавская государственная аграрная академия, 2017. – 232 с.
12. N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko, V.A. Gordienko, V.P. Syroklyn. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. - vol.70. - №8. – p.p. 731-734. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V70.i8.60.
13. 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.p. 1383-1386. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V73.i15.60.
14. Koshevoy, E.M. Kostenko, A.S. Oganessian, M.V. Tsekhovskoi. Aircraft system for measuring the angular deflections of control surfaces // Russian Aeronautics. - October 2013. - Volume 56. - Issue 4. - p.p. 418-422. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799813040168>.

#### REFERENCES:

1. Hoskins, D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing. Applied Optimal Designs. - vol. 4. – 2007. - pp. 147-179.
2. Morgan, J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. Journal of the American Statistical Association. - vol. 100. - no. 471. – 2005. - pp. 1092-1093.
3. Bailey, R. A., Cameron, P. 3. G. Combinatorics of optimal designs. Surveys in Combinatorics. – vol. – 365. – 2009. - pp. 19-73.
4. N. Koshevoy. Optimal cost and time planning of experiment planning: monograph / N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko. - Poltava: publisher Shevchenko R.V. - 2013. - 317 p.

5. Koshevoy N.D. Optimal experiment planning on the basis of the simplex method / N.D. Koshevoy, E.A. Sukhobrus // *Mathematical modeling*. - Dneprodzerzhinsk: Dneprodzerzhinsk State Technical University. - 2012. - Vip. 1 (26). - P. 27-30.
6. Koshevoy N.D. Optimization of experiment plans using the algorithm of the ant system / N.D. Koshevoy, A.S. Chuiko // *Metrology and devices*, 2013. - №2. II (40). - P. 135-137.
7. Koshevoy N.D. Optimal experiment planning with using genetic algorithms / N.D. Koshevoy, E.A. Boobs // *Mathematical Modeling*. - Dneprodzerzhinsk: Dneprodzerzhinsk State Technical University. - 2013. - Vip. 2 (29). - P. 36-40.
8. Koshevoy N.D. Application of annealing simulation algorithm for optimization of multifactorial experimental plans / N.D. Koshevoy, A.V. Belmega, Z.E. Chistykov // *Information Processing Systems*. - Kh: KHUPS named by Ivan Kozhedub, 2015. - Issue 6 (131). - P. 103-111.
9. Koshevoy N.D. Application of greedy algorithm for optimization of multifactorial experiments / N.D. Koshevoy, A.V. Belmega // *Collection of scientific works of the Military Institute of the Kyiv National University. Taras Shevchenko*. - K.: VIKNU, 2014. - Vip. 47. - P. 29-37.
10. Koshevoi N.D. Application of an algorithm for optimizing the swarm of particles to minimize the cost of conducting a multifactorial experiment / N.D. Koshevoy, A.A. Belyaeva // *RadioElectronics, Informatics, Management*. - 2018. - №1. - P. 41.
11. The methodology of the optimal planning for the cost and time of experiment planning: monograph / N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko, A.V. Pavlik and others - Poltava: Poltava State Agrarian Academy. - 2017. - 232 p.
12. N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko, V.A. Gordienko, V.P. Syroklyn. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment // *Telecommunications and Radio Engineering*. - 2011. - vol.70. - №8. - p.p. 731-734. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V70.i8.60.
13. N.D. 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.p. 1383-1386. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V73.i15.60.
14. N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko, A.S. Oganessian, M.V. Tsekhovskoi. Aircraft system for measuring the angular deflections of control surfaces // *Russian Aeronautics*, October 2013. - Volume 56. - Issue 4. - p.p. 418-422. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799813040168>.

д.т.н., проф. Кошевой Н.Д., Муратов В.В.

### ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОБЕЗЪЯНЬЕГО ПОИСКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНОВ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

*Экспериментальные методы исследования все больше применяют для оптимизации технологических процессов. Одной из главных целей эксперимента является получение максимального количества объективной информации о влиянии изучаемых факторов на технологический процесс, при проведении наименьшего количества дорогостоящих опытов. Планирование эксперимента используется для получения математической модели при минимальных стоимостных и временных затратах. Задача нахождения минимальной стоимости проведения эксперимента является NP-трудной, и точное решение можно найти только для небольшого количества факторов. Для количества факторов  $k > 4$  число перестановок резко увеличивается и на современном уровне развития вычислительной техники точно решить задачу невозможно. Для улучшения технико-экономических показателей устройств и систем также следует выполнять экспериментальные исследования, направленные на получение их математических моделей. В дальнейшем с использованием математической модели определяются оптимальные параметры конструкции, обеспечивающие минимальную погрешность измерения устройства, которое разрабатывается. В связи с этим становится актуальной разработка и исследование приближенных алгоритмов.*

*На кафедре авиационных приборов и измерений Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» разработана методология оптимального по стоимостным и временным затратам планирования эксперимента, включающего следующие методы: анализ перестановок, метод последовательного приближения, метод ветвей и границ, случайный поиск (перестановка строк матрицы планирования), симплекс-метод, муравьиный алгоритм, генетический алгоритм, метод отжига, жадный алгоритм, рой частиц. Ведутся*



дальнейшие исследования по выбору лучших методов оптимизации полных факторных экспериментов.

Целью данной статьи является разработка метода и программного обеспечения для оптимизации планов полного факторного эксперимента с использованием алгоритма обезьяньего поиска. Были разработаны метод и программа на языке программирования C++ для оптимизации планов полного факторного эксперимента с использованием алгоритма обезьяньего поиска.

Работоспособность метода была проверена на ряде таких технологических объектов: расход топлива в двигателе внутреннего сгорания, сварки пластин малой толщины, изготовление деталей горячей штамповкой, а также процесса обслуживания машин с числовым программным управлением. Проведен сравнительный анализ методов синтеза оптимальных по стоимостным и временным затратам планов полного факторного эксперимента и показана эффективность метода обезьяньего поиска.

Ключевые слова: алгоритм, метод, оптимальный план, обезьяний поиск, оптимизация, планирование эксперимента, стоимость, выигрыш.

Prof. Koshevoy N.D., Muratov V.V.

#### APPLICATION OF THE MONKEY APPLICATION ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PLANS OF THE FULL FACTOR EXPERIMENT

*Experimental research methods are increasingly used to optimize technological processes. One of the main goals of the experiment is to obtain the maximum amount of objective information about the influence of the investigated factors on the technological process, while carrying out the least number of expensive experiments. Experiment planning is used to obtain a mathematical model with minimum cost and time costs. The task of finding the minimum cost of an experiment is NP-heavy, and the exact solution can be found only for a small number of factors. For the number of factors  $k > 4$ , the number of permutations increases dramatically, and at the current level of development of computing machinery it is impossible to solve the problem precisely. To improve the technical and economic performance of devices and systems, experimental studies aimed at obtaining their mathematical models should also be performed. In the future, using the mathematical model, optimal design parameters are determined that provide the minimum measurement error of the device being developed. In this connection, the development and research of approximate algorithms becomes relevant.*

*At the Department of Aviation Instruments and Measurements at the National Aerospace University named by N.E. Zhukovsky "KhAI" developed a methodology for optimizing the cost and time costs of planning the experiment, which includes the following methods: analysis of permutations, method of successive approximation, method of branches and boundaries, random search (permutation of lines of the matrix of planning), simplex method, ant algorithm, genetic algorithm, annealing method, greedy algorithm, particle swarm. Further research is under way to choose the best methods for optimizing full factor experiments.*

*The purpose of this article is to develop a method and software to optimize the plans of a full factor experiment using the monkey search algorithm.*

*A method and program in the C++ programming language were developed to optimize the plans for a full factor experiment using the monkey search algorithm.*

*The efficiency of the method has been tested on a number of technological objects: fuel consumption in the internal combustion engine, welding of small thickness plates, hot-forming parts manufacturing, and also the process of maintenance of machines with numerical control. A comparative analysis of the methods of synthesis of the optimal cost and time costs of the plans for a full factor experiment is carried out and the efficiency of the monkey-type search method is shown.*

*Keywords: algorithm, method, optimal plan, monkey search, optimization, experiment planning, cost, gain.*