

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗРОСТАЮЧИХ ДЕРЕВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

На сьогоднішній день проблематикою у світі є висока вартість виробництва та ресурсів, через це гостро стає питання оптимізації виробництва для зменшення використання ресурсів. Процес дослідження експерименту на початковому етапі дає змогу зменшити витрати ресурсів за рахунок детального аналізу. Для цього виявляють кроки, які можемо спростити, а це дає економію ресурсів під час виробництва або дослідження. Найчастіше експерименти є багатофакторними і пов'язані з пошуком оптимальних умов проведення, підбором найбільш раціонального обладнання та якісної сировини. Існує необхідність в підвищенні ефективності експериментальних досліджень. Ці дослідження дозволяють докладніше вивчити об'єкти, що дає можливість отримати більше інформації та забезпечує умови їх оптимізації.

В процесі дослідження об'єктів необхідно побудувати їх математичні моделі, які дають можливість визначити раціональне співвідношення параметрів. Планування експерименту дозволяє розрахувати максимально ефективний порядок виконання дослідів та вивчити вплив окремих факторів на критерії оптимізації. Застосування методів планування експериментів допомагає в отриманні максимальної кількості корисної інформації при мінімальних вартісних та часових витрат. В даній статті досліджується метод зростаючих дерев для оптимізації за вартісними витратами планів багатофакторних експериментів. Для підтвердження його працездатності та ефективності проводиться порівняльний аналіз з існуючими методами оптимізації. Метод натхненний еволюцією зростаючих дерев і включає етапи посадки і зростання. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення, які реалізують даний метод. Програмна реалізація алгоритму виконана за допомогою framework Angular.

При дослідженні технологічних процесів була доведена працездатність та ефективність методу зростаючих дерев для оптимізації за вартісними витратами планів багатофакторних експериментів. Проведено його порівняння з бактеріальним методом оптимізації та методом, заснованим на використанні коду Грея. Об'єкт дослідження: процес оптимізації планів багатофакторних експериментів за вартісними витратами. Предмет дослідження: метод зростаючих дерев для оптимізації за вартісними витратами планів багатофакторних експериментів та програмне забезпечення, що його реалізує.

Ключові слова: метод зростаючих дерев, дослідження, багатофакторний експеримент, програмне забезпечення, алгоритм.

Вступ. За збільшенням вартості ресурсів та товарів, питання оптимізації процесів виробництва стоїть досить гостро. Кожна компанія намагається вижити і тим самим оптимізувати свої витрати та зменшити вартість виробництва, збільшити потенціал та фінальну ефективність. Максимально оптимізувати процес виробництва від постанови задачі до реалізації готової продукції. Тому задача оптимізації за часовими та вартісними витратами планів багатофакторних експериментів для дослідження виробництва процесів є актуальною.

При цьому виникає завдання пошуку найбільш ефективного методу оптимізації планів багатофакторних експериментів.

Об'єкт дослідження: процес оптимізації планів багатофакторних експериментів за вартісними витратами.

Предмет дослідження: метод зростаючих дерев для оптимізації за вартісними витратами планів багатофакторних експериментів та програмне забезпечення, що його реалізує.

Мета дослідження: розробка методу зростаючих дерев та програмного забезпечення, що його реалізує; застосування методу при дослідженні технологічних процесів; оцінка ефективності методу.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день існує значна кількість методів оптимізації планів багатофакторних експериментів [1]. Кожен метод має свої переваги, недоліки та специфіку використання. Більшість методів, які мають перевагу у знаходженні максимально наближеної до оптимальної матриці планування, при зростанні кількості факторів стикаються із проблемою зменшення точності рішення та збільшення обчислювальної потужності та загального часу розрахунку оптимального плану експеримента.

Широко відомі такі методи: повний перебір [2], аналіз перестановок [2], випадковий пошук [2], алгоритм оптимізації роєм часток [3], оптимізація бджолиним роєм [4], метод, заснований на застосуванні коду Грея [5], бактеріальний метод [6], алгоритм чорної дірки [7], алгоритм лева [8], метод стрибаючих жаб [9]. Основними недоліками перелічених методів є: обмежена кількість факторів для об'єкта дослідження, низька швидкодія, знаходження матриці планування, яка не наближена до оптимального значення.

В зв'язку з цим виникає потреба в розробці методу, який характеризується такими параметрами: використанням більше ніж п'яти факторів, отриманням оптимального плану експерименту, високою швидкістю. Таким чином, розглядається застосування методу зростаючих дерев для оптимізації за вартісними витратами плану багатофакторного експерименту для дослідження технологічного процесу гальванічного міднення друкованих плат.

Основні матеріали дослідження. Під час виробництва можливі такі причини браку друкованих плат: підгоряння, відслоювання гальванічного покриття, його нерівномірність. Тому виникає необхідність у виконанні попереднього експериментального дослідження технологічного процесу, у побудові адекватної математичної моделі, вибору критерія та методу оптимізації, що дозволить зменшити кількість бракованої продукції.

Операції гальванічної металізації друкованих плат можна описати математичними моделями на основі статистичних методів планування експерименту [10]. Доцільність такого підходу пояснюється складністю досліджуваних процесів, швидкістю отримання математичних моделей, відсутністю детального вивчення хіміко-фізичних закономірностей, які потребують значних вартісних та часових витрат.

Як вихідні показники запропоновані параметри, які характеризують нерівномірність покриття провідників гальванічними опадами.

Ці параметри визначають за такими формулами [11]:

$$\begin{aligned}\Delta h &= \sup H - \inf H; \\ \Delta h_{\text{ср}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i; \\ \Delta h_i &= \sup H_i - \inf H_i; \\ H_i &\subseteq H; i = \overline{1, n}\end{aligned}$$

де Δh - максимальний розкид висоти провідників, $\Delta h_{\text{ср}}$ - середній розкид,

H_i - підмножина множини H , елементами якої є висота провідників, що визначається у характерних локальних місцях n друкованої плати.

Показник R_z визначається згідно з методикою вимірювання параметрів шорсткості поверхні. При цьому вимірюють на профілограмі відстані $h_{i\text{max}}$ від п'яти найбільших максимумів профілю до базової лінії та відстані $h_{i\text{min}}$ від п'яти найбільших мінімумів профілю до базової лінії, мм.

$$R_z = \frac{1}{5V_B} (\sum_{i=1}^5 h_{i\text{max}} - \sum_{i=1}^5 h_{i\text{min}}) * 10^3,$$

де R_z - параметр шорсткості поверхні провідників друкованої плати,

V_B - вертикальне збільшення профілографа.

Метою експериментального дослідження операції гальванічного міднення друкованих плат є побудова математичних моделей, які характеризують зв'язок окремих її параметрів X_i з показниками якості Δh , $\Delta h_{\text{ср}}$, R_z :

$$\Delta h = f_1(X_1, X_2, X_3, X_4);$$

$$\Delta h_{\text{ср}} = f_2(X_1, X_2, X_3, X_4);$$

$$R_z = f_3(X_1, X_2, X_3, X_4).$$

Фактори, що впливають на результат: X_1 – концентрація CuSO_4 в електроліті гальванічної ванни, г/л; X_2 – концентрація H_2SO_4 в розчині, г/л; X_3 – густина струму в гальванічній ванні, А/дм²; X_4 – час обробки плат в цій ванні. Для оптимізації плану повного факторного експерименту 2⁴ за вартісними витратами був застосований метод зростаючих дерев.

Алгоритм реалізації методу зростаючих дерев. Алгоритм зростаючих дерев натхненний еволюцією зростаючих дерев і включає етапи посадки і росту. На етапі посадки саджанці випадково рівномірно розташовуємо в області пошуку, створюючи рівномірний сад. Етап росту реалізуємо за допомогою операторів схрещування, розгалуження, щеплення.

Метод зростаючих дерев базується на використанні графів типу дерева. Граф типу дерева - це зв'язковий ациклічний граф, який відомий своєю простотою та ефективністю [12].

Суть оптимізації плану багатofакторного експерименту методом зростаючих дерев полягає в наступному.

Крок 1. Вибір кількості факторів.

Крок 2. Введення значення вартості переходів для кожного з факторів.

Крок 3.1. Генерація початкової матриці в залежності від кількості факторів.

Крок 3.2. Визначення послідовності проведення розрахунків матриць.

Крок 4. Розрахунок вартості початкової матриці.

Крок 5.1. Підстановка рядка на початок матриці.

Крок 5.1.1. Підрахунок вартості переходу між вибраним рядком та наступним.

Крок 5.1.2. Пошук мінімальної різниці вартості переходу вибраного рядку з рядком, який не був ще використаний у матриці.

Крок 5.1.3. Усі рядки з матриці були використані.

Крок 5.1.4. Замінюємо початковий рядок матриці на наступний, який не був використаний, і проводимо розрахунок.

Крок 5.2. Усі рядки матриці були підставлені на початок матриці та проведені за такою схемою.

Крок 6.1. Розрахунок вартості всіх отриманих матриць.

Крок 6.2. Проводимо порівняння вартості отриманих матриць.

Крок 7. На основі отриманих результатів обираємо матрицю з мінімальною сумарною вартістю.

Крок 8. Порівняння та аналіз початкової матриці з оптимальною, яка була розрахована за допомогою методу зростаючих дерев.

Крок 9. Виведення отриманих результатів на екран.

Програмна реалізація алгоритму виконана за допомогою framework Angular на мові розробки TypeScript [13], який є надбудовою над мовою програмування JavaScript. Переваги використання Angular полягає у тому, що він побудований на основних принципах об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). Методологія ООП заснована на представленні програми у вигляді сукупності взаємодіючих об'єктів, кожен із яких є екземпляром певного класу, а класи утворюють ієрархію спадкування.

Схема алгоритму роботи методу зростаючих дерев представлена на рис. 1.

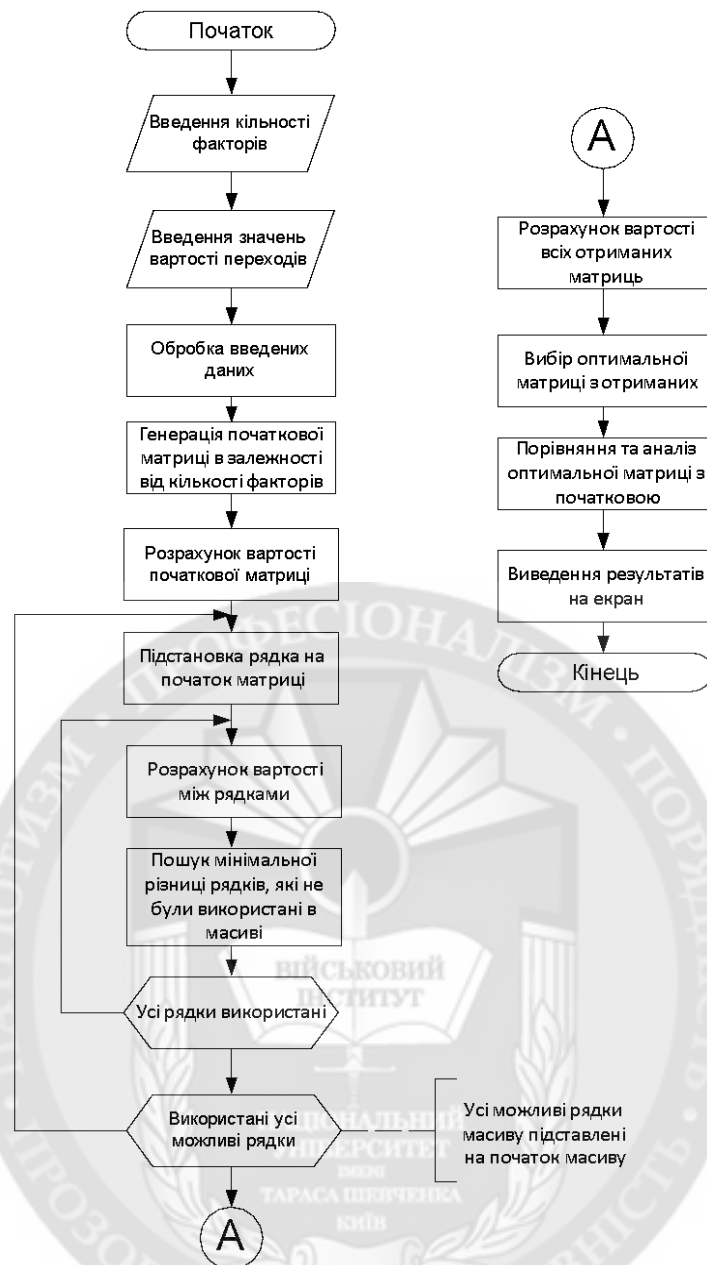


Рисунок 1 – Схема реалізації методу зростаючих дерев

Результат оптимізації. Була проведена оптимізація планів багатофакторних експериментів методами зростаючих дерев, бактеріальної оптимізації, методом, що ґрунтується на використанні коду Грея. Виконано порівняльний аналіз отриманих планів експерименту.

Вартості змін значень рівнів факторів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Вартість змін значень рівнів факторів, ум. од.

Фактор	Вартість змін значень рівнів, ум. од.	
	з «-1» до «+1»	з «+1» до «-1»
X ₁	18.85	7.45
X ₂	8.65	4.45
X ₃	0.19	0.18
X ₄	1.15	0.77

У табл. 2 приведена початкова матриця багатофакторного експерименту.

Таблиця 2

Початкова матриця багатофакторного експерименту

Номер досліду	Фактори			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Плани багатофакторних експериментів, отриманих методом, що ґрунтується на використанні коду Грея та бактеріальної оптимізації, представлені в табл. 3.

Таблиця 3

План багатofакторного експерименту, що ґрунтується на використанні коду Грея, та план, отриманий методом бактеріальної оптимізації

Метод, заснований на кодi Грея					Бактеріальний метод				
Номер дослідy	Фактори				Номер дослідy	Фактори			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-	-	-	-	1	+	+	+	+
2	-	-	-	+	2	+	+	-	+
3	-	-	+	+	3	+	+	+	-
4	-	-	+	-	4	+	+	-	-
5	-	+	+	-	5	+	-	+	+
6	-	+	+	+	6	+	-	-	+
7	-	+	-	+	7	+	-	+	-
8	-	+	-	-	8	+	-	-	-
9	+	+	-	-	9	-	+	+	+
10	+	+	-	+	10	-	+	-	+
11	+	+	+	+	11	-	+	+	-
12	+	+	+	-	12	-	+	-	-
13	+	-	+	-	13	-	-	+	+
14	+	-	+	+	14	-	-	-	+
15	+	-	-	+	15	-	-	+	-
16	+	-	-	-	16	-	-	-	-

Для знаходження мінімальної вартості проведення експерименту було проведено оптимізацію початкового плану ПФЕ методом зростаючих дерев. План отриманого багатofакторного експерименту наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Оптимальний план багатфакторного експерименту, отриманий методом зростаючих дерев

Номер досліду	Фактори			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	+	+	-	-
2	+	+	+	-
3	+	+	+	+
4	+	+	-	+
5	+	-	-	+
6	+	-	+	+
7	+	-	+	-
8	+	-	-	-
9	-	-	-	-
10	-	-	+	-
11	-	-	+	+
12	-	-	-	+
13	-	+	-	+
14	-	+	+	+
15	-	+	+	-
16	-	+	-	-

Вартісні витрати на реалізацію експерименту за початковим планом складають 252.61 ум. од., за оптимальним планом – 25.87 ум. од. Порівняно з початковим планом, виграш становить 9.76 разів. А у порівнянні з планом експерименту, отриманим з використанням коду Грея, вартість реалізації якого дорівнює 40.37 ум. од., отримуємо виграш 1,56 разів. Порівнюючи з вартістю реалізації плану експерименту, отриманого бактеріальним методом, що складає 34.30 ум.од., виграш становить 1.33 рази.

Результати порівняння ефективності методу зростаючих дерев з іншими методами представлені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати порівняння ефективності методу зростаючих дерев з іншими методами

Метод оптимізації	Вартість, ум.од.
Початковий метод	252.61
Код Грея	40.37
Бактеріальний метод	34.30
Метод зростаючих дерев	25.87

Висновки. Для оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними витратами розроблено метод зростаючих дерев. Для реалізації методу було розроблено програмне забезпечення за допомогою framework Angular на мові розробки TypeScript [13]. У порівнянні з методом, отриманим з використанням коду Грея, та бактеріальним методом, була доведена працездатність та ефективність методу зростаючих дерев.

За результатами дослідження метод зростаючих дерев дає вигреш у вартості в 9.76 разів у порівнянні з початковим планом експерименту. У порівнянні з планом експерименту, отриманим з використанням коду Грея, маємо вигреш в 1.56 разів, а у порівнянні з бактеріальним методом перевага складає 1.33 рази.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кошовий М. Д., Бурлесв О. Л., Пампуха А. І. Аналіз методів оптимального планування багатофакторного експерименту за вартісними та часовими показниками. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2022. – №75. С. 94-107. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-10>.
2. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента: монография. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Х.: ХАИ; Полтава: Шевченко Р. В., 2013. – 316 с. ISBN 978-966-8798-89-4.
3. 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 / 1607-3274-2018-1-1.
4. Карпенко А. П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. Информационные технологии. 2012. № 7. С. 1-32.
5. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Pavlyk A. V., Koshevaya I. I., Rozhnova T. G. Research of multiple plans in multi-factors experiments with a minimum number of transitions of levels of factors. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. no 2, P.53-59. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-6.
6. Кошовий М. Д., Пилипенко О. Т. Застосування методу бактеріальної оптимізації для мінімізації витрат часу при проведенні багатофакторного експерименту. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2021. – №72. С. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2021/72-04>.
7. A. Hatamlou, Black hole: A new heuristic optimization approach for data clustering, Information sciences, 2013 - vol. 222, pp. 175–184,.
8. M. Yazdani, F. Jolai, Lion optimization algorithm (loa): a nature-inspired metaheuristic algorithm, Journal of computational design and engineering, 2016 - vol. 3, no. 1, pp. 24–36.
9. Koshevoy N. D., Muratov V. V., Kirichenko A. L., Borisenko S. A. Application of the “jumping frogs” algorithm for research and optimization of the technological process. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021. no1(1). – P. 57 – 65. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-6.
10. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий (программное введение в планирование эксперимента) / Ю.П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 283 с.
11. Кошевой Н. Д. Автоматизация экспериментальных исследований: моногр. / Н.Д. Кошевой, В.А. Гаевой. – Х.: Факт, 2001. – 112 с.
12. Харари Ф. Теория графов / Ф. Харари. – М.: Мир, 1973. – 302 с.
13. Введение в typescript [Електронний ресурс]. – 2021. URL: <https://metanit.com/web/typescript>.

REFERENCES:

1. Koshoviy M. D., Burleev O. L., Pampuha A. I. Analiz metodiv optimalnogo planuvannya bagatofaktornogo eksperymentu za vartisnimi ta chasovimi pokaznikami [Analysis of methods of optimal planning of a multifactorial experiment by cost and time indicators]. Zbirnik naukovih prats Viyskovogo Institutu Kyivskogo natsionalnogo universitetu Imeni Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU, 2022. – No. 75. pp. 94-107.
2. Koshevoy N. D. and Kostenko E. M. Optimalnoe po stoimostnyim i vremennyim zatratam planirovanie eksperimenta [Optimal cost and time planning of the experiment]: monografiya. Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «Khark. aviats. in-t». – Kh.:KhAI; Poltava: Shevchenko R. V., 2013. – 316 pp. ISBN 978-966-8798-89-4.
3. Koshevoy N. D. and Belyaeva A. A. Primenenie algoritma optimizatsii roem chastits dlya minimizatsii stoimosti provedeniya mnogofaktornogo eksperimenta [Application of the Particle Swarm Optimization Algorithm to Minimize the Cost of Conducting a Multivariate Experiment]. Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. - 2018. - № 1. - pp. 41-49. DOI: 10.15588 / 1607-3274-2018-1-1.
4. Karpenko A.P. Populyatsionnyie algoritmyi globalnoy poiskovoy optimizatsii. Obzor novyih i maloizvestnyih algoritmov [Population algorithms for global search optimization. Overview of new and little-known algorithms]. Informatsionnyie tehnologii. 2012. № 7. P. 1-32.
5. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Pavlyk A. V., Koshevaya I. I. and Rozhnova T. G. Research of multiple plans in multi-factors experiments with a minimum number of transitions of levels of factors. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2, P. 53-59. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-6.
6. Koshevoy N. D. and Pylypenko O.T. Zastosuvannya metodu bakterialnoyi optimizatsiya dlya minimizatsiyi vitrat chasu pri provedeni bagatofaktornogo eksperymentu [Application of the bacterial optimization method to minimize time spent in multifactorial experiments]. Zbirnik naukovih prats Viyskovogo Institutu Kyivskogo natsionalnogo universitetu Imeni Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU. – 2021. No. 72. – pp. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2021/72-04>
7. A. Hatamlou, Black hole: A new heuristic optimization approach for data clustering, Information sciences, 2013 - vol. 222, pp. 175–184,.
8. M. Yazdani and F. Jolai, Lion optimization algorithm (loa): a nature-inspired metaheuristic algorithm, Journal of computational design and engineering, 2016 - vol. 3, no. 1, pp. 24–36.
9. Koshevoy N. D., Muratov V. V., Kirichenko A. L. and Borisenko S. A. Application of the “jumping frogs” algorithm for research and optimization of the technological process. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021. no1(1). – P. 57-65. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-6.
10. Adler Y.P., Markova E.V. and Granovskiy Y. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyih usloviy (programmnoe vvedenie v planirovanie eksperimenta) [Experiment design in search of optimal conditions (software introduction to experiment design)]. - M.: Nauka, 1971 – P. 283
11. Koshevoy N. D. and Gaevoy V. A. Avtomatizatsiya eksperimentalnyih issledovaniy [Automation of experimental research]: monografiya. H.: Fakt, 2001 - P. 112.
12. Harari F. Teoriya grafov [Graph theory]. – M.: Mir, 1973. – P. 302.
13. Vvedenie v typescript [Introduction to typescript]. – 2021. URL: <https://metanit.com/web/typescript>.

Doctor of Technical Science, Koshovyi M. D.,
Pylypenko O.T.

APPLICATION OF THE GROWING TREES METHOD FOR OPTIMIZING PLANS OF MULTIFACTOR EXPERIMENTS

Nowadays, the high cost of production and resources is the problem in the world, because of this, the issue of optimizing production to reduce the use of resources becomes acute. The research of the experiment at the initial stage makes it possible to reduce resource costs due to detailed analysis. For this we identify steps that we can simplify, which saves resources during production or research. Most often, experiments are multifactorial and related to the search for optimal conditions, selection of the most rational equipment and high-quality raw materials. There is a need to increase the effectiveness of experimental research. These researches allow us to study objects in detail, which provides the ability to obtain more information and offers conditions for their optimization.

In the process of researching objects, it is necessary to build their mathematical models, which allow us to determine a rational ratio of parameters. Experiment planning allows for calculating the most effective order of performing experiments and studying the influence of individual factors on optimization criteria. The use of experimental planning methods helps in obtaining the maximum amount of useful information with minimal cost and time spent.

This article examines the growing tree method for cost optimization of multifactor experimental plans. To confirm its functionality and effectiveness, a comparative analysis is conducted with existing optimization methods. The method is inspired by the evolution of growing trees and includes the stages of planting and growth. An algorithm and software that implement this method have been developed. The software implementation of the algorithm is made with the help of the framework Angular.

In the study of technological processes, the functionality and effectiveness of the method of growing trees for cost optimization of plans of multifactor experiments has been proven. It has been compared with the bacterial optimization method and the method based on the use of the Gray code. The object of research: the process of optimization of plans of multifactor experiments according to its cost.

The subject of study: growing tree method for cost optimization of multifactor experimental plans and software implementing it.

Keywords: growing tree method, research, multifactor experiment, software, algorithm.

