

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ЗА ВАРТІСНИМИ ТА ЧАСОВИМИ ПОКАЗНИКАМИ

Об'єктом дослідження є аналіз стану розвитку методів оптимального планування багатофакторного експерименту за вартісними та часовими показниками. Предметом дослідження є методи оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними та часовими показниками. Мета: розробка практичних рекомендацій щодо застосування існуючих методів оптимізації планування експерименту за часовими та вартісними показниками на основі їхнього порівняльного аналізу. Завданнями є проведення порівняльного аналізу методів оптимізації планів багатофакторного експерименту за характеристиками: допустима кількість факторів для ефективної оптимізації, вид плану, точність методу, кількість критеріїв оптимізації, швидкодія; розробка практичних рекомендацій щодо використання цих методів; формування напрямів подальшого розвитку досліджуваної теми. Методи: метод порівняльного аналізу, методи оптимізації на основі вивчення природи, комбінаторні методи оптимізації, графові методи оптимізації, наближені методи оптимізації. Отримані результати. Проаналізовано 20 методів оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними та часовими показниками. Надано 6 практичних рекомендацій щодо їхнього застосування у діапазоні кількості факторів $2 < k \leq 16$. Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні порівняльного аналізу існуючих методів оптимального планування багатофакторного експерименту, базуючись на основі 5 характеристик з точки зору експериментатора, а саме: допустимої кількості факторів для ефективної оптимізації, виду плану, точності методу, кількості критеріїв оптимізації; швидкодії. В подальшому планується дослідження класифікації методів оптимізації планів багатофакторного експерименту, розробка та удосконалення методів двокритеріальної оптимізації за вартісними та часовими характеристиками, аналіз швидкодії наближених методів оптимізації для $k > 7$ та їх удосконалення.

Ключові слова: планування багатофакторного експерименту, точні методи оптимізації, наближені методи оптимізації, критерій оптимізації, швидкодія, двокритеріальна оптимізація.

Вступ. Експериментальне дослідження – невід'ємна частина вивчення сучасних процесів, систем та моделей. Реалізація експерименту має бути ефективною в умовах постійного зростання апріорної кількості інформації та ускладнення економічної ситуації в світі. Це означає, що в результаті дослідження необхідно отримувати адекватні математичні моделі при мінімальних часових та вартісних витратах. Для вирішення цієї задачі застосовується оптимальне за вищевказаними показниками планування багатофакторного експерименту (БФЕ), що враховує нерівнозначність порядку його реалізації. Пошук плану найшвидшого за часом реалізації або найменшого за вартістю ускладнюється при зростанні кількості факторів.

Таким чином, створення методів оптимального планування багатофакторного експерименту за вартісними та часовими показниками є актуальним науково-практичним завданням, що потребує більш детального вивчення.

Аналіз останніх досліджень. В наукових публікаціях описано 20 методів оптимізації БФЕ за вартісними та часовими показниками.

До точних методів відносяться: метод аналізу перестановок (повний перебір) [1, 2];

метод гілок та меж [3 - 7]; метод оптимізації планів на основі серійних послідовностей [8]; комбінаторно-графовий метод [9].

Існують методи, що створені на основі вивчення природи, а саме: метод «стрибаючих жаб» для оптимального планування БФЕ [10]; метод мавп'ячого пошуку для оптимізації повного факторного експерименту [11]; метод пошуку «косяком риб» оптимальних планів

БФЕ [12]; метод рою частинок для оптимізації планів БФЕ [13, 14]; метод оптимального планування експерименту на основі генетичних алгоритмів (класичний, комірковий, острівна модель) [15, 16]; метод пошуку оптимальних планів БФЕ на основі мурашиних алгоритмів [17].

Іншими наближеними методами є: метод послідовного наближення для оптимізації композиційних планів [18]; композиційний метод побудови локальних оптимальних планів експерименту [19]; метод оптимального планування БФЕ на основі жадібного алгоритму [20]; метод імітації відпалу для оптимального планування БФЕ [21]; симплекс-метод для оптимального планування БФЕ [22]; метод випадкового пошуку для оптимального планування БФЕ [23]; метод синтезу оптимальних планів на основі коду Грея [24 - 29]; метод найближчого сусіда [30]; метод табу-пошуку [31]; метод вкладених розбивок [32].

Узагальнена методологія оптимального планування експерименту за часовими та вартісними показниками розроблена в роботі [19]. В наукових працях [33 - 36] проведено частковий порівняльний аналіз методів оптимізації планів багатofакторного експерименту. Найбільш повний аналіз існуючих методів оптимізації запропонований в роботі [37].

В роботах [38 - 40] зроблені спроби систематизувати програмно-апаратні засоби для реалізації вищеперерахованих методів.

Постановка задачі. Оскільки теорія оптимального планування експерименту за часовими та вартісними показниками продовжує розвиватися, то на сьогоднішній момент відсутній повний аналіз всіх існуючих методів та практичні рекомендації щодо їхнього використання при проведенні БФЕ.

Мета статті. На основі порівняльного аналізу існуючих методів оптимізації планування експерименту за часовими та вартісними показниками надати практичні рекомендації щодо їх застосування та визначити напрями подальшого удосконалення.

Методологія дослідження. Для того, щоб аналіз методів мав прикладне значення, доцільно використовувати критерії аналізу, що будуть давати адекватну оцінку для вибору перш за все експериментатору. Такий підхід, що акцентує увагу на потреби дослідника, дасть змогу в подальшому зробити класифікацію існуючих методів, покаже перспективу для розвитку теорії оптимального планування експерименту та дозволить надати конкретні практичні рекомендації щодо їх використання.

Основними критеріями для оцінки та вибору експериментатором методу оптимізації є:

допустима кількість факторів для ефективної оптимізації ($k > 3$; $k \leq 3$);

вид плану (повний факторний експеримент [ПФЕ]; дробний факторний експеримент [ДФЕ]; ортогональний центральний композиційний план [ОЦКП]; ротатабельний центральний композиційний план [РЦКП]);

точність методу (точний, наближений);

можливість двокритеріальної оптимізації (з обмеженням на другий критерій, середньозважений тощо);

швидкодія.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз існуючих методів на основі вищевказаної методології.

1. Метод аналізу перестановок (повний перебір). Метод передбачає перебір варіантів планів експерименту, що передбачає перестановку рядків початкового плану експерименту. Здійснюючи повний перебір усіх перестановок можна знайти оптимальний план з мінімальною вартістю чи часом реалізації [2].

Загальна кількість варіантів планів розраховується за формулою

$$n = N! = a^k! \quad (\text{при ПФЕ}), \quad (1)$$

де n – загальна кількість варіантів планів;

N – кількість дослідів;

a – кількість рівнів факторів;

k – кількість факторів.

Переваги методу: простота реалізації методу; абсолютно точний; можна використовувати для багаторівневих планів за умовою $N \leq 8$.

Недоліки методу: працездатність методу ефективна для планів з дворівневими значеннями факторів та $k \leq 3$ для ПФЕ та $N \leq 8$ для ДФЕ; однокритеріальна оптимізація.

2. Метод гілок та меж. Метод дозволяє послідовно цілеспрямовано перебирати сукупність можливих планів експерименту та в подальшому розглядати тільки ті, що є найперспективнішими за обраними характеристиками. При цьому множина планів, що не відповідає встановленим параметрам, відкидається. Процес триває, поки не буде знайдено оптимальний за заданим критерієм план експерименту [41].

Загальна кількість варіантів планів у найгіршому випадку пошуку оптимального плану розраховується за формулою 1, однак цей метод дозволяє значно скоротити час на пошук в порівнянні з методом аналізу перестановок.

В роботі [4] описано застосування цього методу для двокритеріальної оптимізації матриці планування експерименту з накладанням обмеження на додатковий критерій. Оптимізація планів БФЕ для композиційних планів другого порядку при дослідженні об'єкту, що характеризується квадратичною моделлю, представлена в роботах [5, 6], а двопараметрична оптимізація – в роботі [7].

Переваги методу: точний; можливість двокритеріальної оптимізації; застосовується для ПФЕ, ДФЕ, ОЦКП, РЦКП; працездатність методу ефективна для $k \leq 7$ (для ПФЕ та ДФЕ) та $k \leq 5$ для ОЦКП чи РЦКП.

Недоліки методу: факторіальна складність алгоритму, в результаті чого ефективність методу суттєво знижується при збільшенні вхідних даних: кількості факторів або їх рівнів.

3. Метод оптимізації планів на основі серійних послідовностей. Сутність методу полягає у представленні планів БФЕ у формі серійних послідовностей. При зміні порядку експериментів змінюється вид серійних послідовностей. Таким чином, процедура пошуку оптимального плану БФЕ зводиться до формування множини відповідних типових серійних послідовностей, кількість яких значно менша за кількість можливих планів БФЕ, та вибору серед них оптимального варіанта [8].

Максимальну кількість змін рівнів факторів для ПФЕ ($r = 2$, де r – кількість рівнів факторів) можна знайти за формулою

$$W_{max}(k) = 2^{k-1} \times k + (2^{k-1} - 1) \times (k - 1) \quad (2)$$

де W_{max} – максимальна кількість змін рівней факторів;

k – кількість факторів.

Переваги методу: точний; висока швидкодія; працездатність методу ефективна для $k \leq 16$.

Недоліки методу: однокритеріальна оптимізація; необхідність більшого обсягу пам'яті для формування типових серійних послідовностей; ефективність методу суттєво знижується при збільшенні кількості рівнів.

4 Комбінаторно-графовий метод. Комбінаторно-графовий метод дозволяє розглядати лише перспективні варіанти для побудови оптимального плану експерименту. Він заснований на використанні Ф-графів – орієнтованих зважених графів, що дозволяють урахувати послідовність зміни рівней факторів при проведенні експерименту. Вершини такого графа мають різний окрас, а ребра – різну вагу (значення критерія оптимізації) [9].

Кількість варіантів, які необхідно проаналізувати в запропонованому методі визначається за формулою:

$$N_g = h \times 2^n \times n!, \quad (3)$$

де N_g – загальна кількість проаналізованих варіантів планів;
 h – кількість графічних розбивок;
 n – кількість вхідних факторів.

Переваги методу: точний; працездатність методу ефективна для кількості факторів $3 < k \leq 7$.

Недоліки методу: складність реалізації методу; ефективність методу суттєво знижується при збільшенні кількості рівнів; необхідність більшого обсягу пам'яті для зберігання каталогів типових оптимальних планів та розбивок; однокритеріальна оптимізація.

5. Метод «стрибаючих жаб» для оптимального планування БФЕ. У запропонованому методі поєднується пошук локального екстремуму в «стаї жаб», або мемеплексу, та глобального пошуку оптимума критерія оптимізації, завдяки порівнянню положення «найуспішніших жаб» кожного мемеплексу між собою [42]. Визначення «найуспішнішої жаби» відбувається за найменшим значенням критерію оптимізації щодо переходів між рівнями для кожного з факторів. В межах мемеплексу відбувається сортування позицій «жаб» за спаданням. Згідно алгоритму «найгірша жаба» завжди намагається покращити своє положення шляхом випадкового переміщення в напрямку «найуспішнішої жаби» [10]. Кількість ітерацій задається дослідником.

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для $k \leq 7$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат.

6. Метод мавп'ячого пошуку для оптимізації планів БФЕ. Вказаний метод заснований на метаевристичному алгоритмі, що відображає пошук їжі мавпами в горах [43]. Він поєднує елементи визначення локальних оптимумів критерію оптимізації в межах певного блоку даних (досліджуваної області), алгоритм руху агента «вгору» сторону глобального оптимума та зберігання його значення в межах заданої дослідником кількості кроків. При цьому кількість блоків в стовпцях, по яким переміщується агент (мавпа), визначається за формулою [11]:

$$N_{\text{блоків}} = 2N, \quad (4)$$

де $N_{\text{блоків}}$ – кількість блоків;
 N – номер стовпця.

Переваги методу: висока швидкодія; простота реалізації; працездатність методу ефективна для $k \leq 7$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат.

7. Метод пошуку «косяком риб» оптимальних планів БФЕ. Метод заснований на алгоритмі пошуку косяком риб [44] та базується на перестановці стовпців плану експерименту в залежності від значення суми переходів між рівнями для кожного з факторів. «Косяки риб» формуються за таким принципом: менше «косяків риб» там, де більша сума переходів між рівнями факторів. Після цього відбувається перестановка агентів, розташованих поблизу в матриці плану експерименту [12]. Кількість ітерацій задається дослідником.

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для $k > 3$ (ПФЕ).

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат.

8. Метод рою частинок для оптимізації планів БФЕ. Суть метода полягає у моделюванні поведінки популяції частинок в просторі критерія оптимізації [13]. Згідно нього спершу формується зведена матриця планування експерименту. Розміщення частинок по всій зведеній матриці має випадковий характер, а частинка – довільний напрямком вектору швидкості. При переміщенні частинки вздовж стовпців та рядків матриці в кожній точці обчислюється значення критерію оптимальності плану експерименту. В процесі руху

частинки запам'ятовується найкраще значення критерія оптимізації та розташування найкращої знайденої точки, а також відбувається корегування швидкості частинки з урахуванням наближеності до самостійно знайденої і глобальної кращої точки. Після певної кількості ітерацій частки розміщуються навколо глобальної найкращої точки, що призводить до зміни поточних координат кожної частинки. На останньому кроці алгоритму, що реалізує вказаний метод, проводиться перевірка на знаходження нової глобальної найкращої точки та збереження її координат і значення критерія оптимізації плану експерименту [14].

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для кількості факторів $k > 3$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат.

9. Метод оптимального планування експерименту на основі генетичних алгоритмів (класичний, комірковий, острівна модель). Сутність методу полягає у застосуванні підходу генетичної спадковості, за яким плани експерименту представляються у вигляді індивідів, або набору генів, що характеризують рядки матриці плану БФЕ. Процес пошуку оптимального плану експерименту здійснюється на основі значень функції пристосованості. Підвищити ефективність методу дозволяє використання принципу елітарного підходу та процедури двокрапкового схрещування [15].

У варіантах класичного генетичного алгоритму та острівної моделі схрещування відбувається з використанням РМХ кроссовера, а у варіанті коміркового генетичного алгоритму – МРХ кроссовера [45].

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для багаторівневих планів та $k > 3$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; необхідність більшого обсягу пам'яті для зберігання проміжних планів БФЕ.

10. Метод пошуку оптимальних планів БФЕ на основі мурашиних алгоритмів. Метод базується на використанні мурашиних алгоритмів (мурашиної системи, МАКС-МІН, мурашиної колонії тощо), що моделюють поведінку мурах при пошуку дороги до їжі [46]. Згідно методу формується матриця дуг, елементи якої $d_{i,j}$ – значення критерію оптимізації при переході з i -ого в j -ий експеримент початкової матриці планування. Після цього на кожній дузі розміщується початкова кількість феромону, а також виконується розміщення мурах по відповідній кількості вузлів. Далі мурахи переміщуються по вузлам матриці стохастично, змінюючи кількість феромону на своєму шляху [17]. Оскільки метод має імовірнісний характер, то кількість ітерацій задається дослідником. По завершенню виконання заданої кількості кроків визначається оптимальний план БФЕ та значення критерію оптимізації.

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для кількості факторів $3 < k \leq 10$.

Недоліки методу: наближений; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат; однокритеріальна оптимізація.

11. Метод послідовного наближення для оптимізації композиційних планів. Основою цього методу є послідовне переміщення рядків матриці та пошук місця в плані БФЕ, що призводить до найбільшого ефекту з точки зору оптимізації (зменшення вартості або часу) при реалізації експерименту. Спочатку відбувається зміна положення одного рядка, потім двох, трьох і т. д. Якщо при повторенні таких дій кращий результат не був знайдений, то отриманий план фіксується як оптимальний [18].

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для $3 < k \leq 10$; оптимізація композиційного плану (ОЦКП чи РЦКП); невеликий обсяг пам'яті при обчисленні.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; ефективність методу суттєво знижується при збільшенні вхідних даних: кількості факторів або їх рівнів.

12. Композиційний метод побудови локальних оптимальних планів експерименту. Запропонований метод включає багаторівневу композицію локальних оптимальних планів

БФЕ. Сукупність вхідних факторів ділиться на h груп по k_i факторів в i -ій групі [19].

Загальна кількість можливих варіантів розділення k факторів на h груп визначається за формулою:

$$L(k, h) = C_k^{k_1} \times \prod_{i=2}^h C_{k - \sum_{j=1}^{i-1} k_j}^{k_i}, \quad (5)$$

де k – загальна кількість факторів;

i, j – порядковий номер групи розділення плану БФЕ;

h – загальна кількість груп розділення плану БФЕ;

k_i, k_j – кількість факторів в i -тому або j -тому розбитті.

В кожній групі планів існує сукупність локальних планів БФЕ. Для того, щоб зберегти нульову вартість зміни рівнів між локальними планами, значення рівнів факторів першого досліду i -ого плану співпадають зі значеннями рівнів факторів останнього досліду ($i-1$) плану.

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для $k > 3$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; більший обсяг пам'яті для зберігання локальних планів БФЕ; ефективність методу суттєво знижується при збільшенні вхідних даних: кількості факторів або їх рівнів.

13. Метод оптимального планування на основі жадібного алгоритму. Метод дозволяє отримувати локальні оптимальні плани БФЕ на основі покрокового послідовного знаходження локальних оптимальних дослідів та ґрунтується на тому, що якщо на кожному локальному етапі вибирався оптимальний перехід, то і загальний план проведення експерименту буде оптимальним. Вказана процедура відбувається шляхом обчислення значення параметру переходу рядка матриці з початкового стану в стан поточного можливого переходу та знаходження його мінімального значення серед всіх можливих варіантів. Після аналізу всіх можливих переходів з кожного досліду формується оптимальний план БФЕ [20].

Загальна складність алгоритму, на якому базується метод – $O(N \cdot \log N)$, де N – загальна кількість дослідів, O – позначення складності алгоритму.

Переваги методу: висока швидкодія; простота реалізації методу; двокритеріальна оптимізація; працездатність методу ефективна для багаторівневих планів та $k > 3$.

Недоліки методу: наближений (в окремих випадках може давати найгірший результат); однокритеріальна оптимізація.

14. Метод імітації відпалу для оптимального планування БФЕ. В основі метода лежить обрахунок степеню сканування (row), що визначається дослідником самостійно, та генерації двох випадкових чисел X, Y в межах від k до 2^k (k – кількість вхідних факторів). Після їх отримання відбувається перестановка в поточному плані експерименту дослідів під номерами X та Y . Якщо утворений план краще початкового за критерієм оптимізації, то новостворений визначається як оптимальний. При перевищенні значення обраного степеню сканування формується кінцевий результат оптимального плану [21]. Складність алгоритму, на якому базується метод, – $O(row \cdot 2^k)$.

Переваги методу: висока швидкодія для $3 \leq k \leq 5$; простота реалізації методу.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат; при $k > 5$ швидкодія методу зменшується.

15. Симплекс-метод для оптимального планування БФЕ. У запропонованому методі план БФЕ моделюється опуклим багатогранником у багатовимірному просторі. Кожне значення рівня факторів представляється у вигляді вершини багатогранника. На кожному кроці відбувається послідовне переміщення до тієї вершини, що дозволяє отримати мінімальне значення критерію оптимізації при переході з попередньої [22].

Таким чином, за допомогою симплекс методу можна отримати оптимальні або близькі до оптимальних плани БФЕ.

Переваги методу: висока швидкодія; простота реалізації без застосування комп'ютерної

техніки; працездатність методу ефективна для $k > 3$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; ефективність методу суттєво знижується при збільшенні вхідних даних: кількості факторів або їх рівнів.

16. Метод випадкового пошуку для оптимального планування БФЕ. Метод базується на алгоритмі перестановки стовпців або рядків матриці планування експерименту. Кількість стовпців дорівнює кількості вхідних факторів. Здійснюючи повний перебір усіх перестановок можна знайти наближений оптимальний план з мінімальною вартістю чи часом реалізації. При перестановці рядків експериментатор завчасно визначає кількість кроків ітерації [23].

Переваги методу: простота реалізації; висока швидкодія; не залежить від виду плану; працездатність методу ефективна для кількості факторів $k \leq 6$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; ефективність методу суттєво знижується при збільшенні вхідних даних: кількості факторів або їх рівнів.

17. Метод синтезу оптимальних планів на основі коду Грея. Код Грея - це система обчислення, в якій два сусідніх значення розрізняються лише в одному розряді [47]. Суть запропонованого методу полягає в тому, що ПФЕ представляється у вигляді кодової маски, виконаної в коді Грея [24 - 26].

Для побудови оптимального плану експерименту можна використовувати два наступних правила:

- 1) рядки плану експерименту заповнюються з «-1», а їхня кількість дорівнює 2^{i-1} , де i - номер фактора;
- 2) план формується шляхом чергування груп символів з «+1» і «-1», а їхня кількість визначається як 2^i .

При складанні плану в якості першого фактора необхідно вибирати той, що має найменші показники критерія оптимізації при зміні значень рівнів фактора. Далі фактори слід обирати таким чином, що значення критерія оптимізації зростало.

В роботі [28] описано похідний метод для дробного факторного експерименту, що відрізняється кодовою маскою, яка заснована на коді Грея з кількістю дослідів $N = 2^{k-n}$ (k - загальна кількість факторів; n - кількість факторів, що прирівняна до взаємодій $(k-n)$ факторів). При цьому значення рівнів n факторів прирівнюються до значень взаємодій $(k-n)$ факторів. Спочатку будується план ПФЕ 2^{k-n} , що є оптимальним за загальною кількістю переходів з «-1» в «+1» та навпаки, а потім з нього формується план ДФЕ. При його складанні в якості взаємодій необхідно вибирати такі, що мають мінімальну кількість переходів рівнів факторів, а в якості фактору X_l - фактор, що має найменше значення критерію оптимізації при зміні переходів його рівнів. Наступні ж фактори обираються з урахуванням зростання цих значень.

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для кількості факторів $k \leq 5$; можливість будувати плани БФЕ вручну.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; застосовується для дворівневих планів ПФЕ та ДФЕ; ефективність методу суттєво знижується при збільшенні вхідних даних: кількості факторів або їх рівнів.

18. Метод найближчого сусіда. Представлений метод базується на алгоритмі найближчого сусіда [48], який використовується при побудові оптимального плану починаючи з другого рядка. При цьому відбувається перебір всіх дослідів початкової матриці планування експерименту, які ще не додавали в нову. Його метою є пошук дослідів, вартість переходу до якого від попереднього буде мінімальною [30].

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для кількості факторів $k > 3$.

Недоліки методу: наближений; однокритеріальна оптимізація; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат.

19. Метод табу-пошуку. Запропонований метод табу-пошуку є метаевристичним та заснованим на локальному пошуку. На кожному кроці ітерації в якості нового поточного

рішення вибирається краще рішення в околі поточного, навіть якщо це призводить до збільшення вартості рішення. Таким чином, метод табу-пошуку дозволяє обійти погані локальні екстремуми [31]. Обов'язковою умовою реалізації метода табу-пошуку є завчасне визначення кількості кроків ітерацій – N та довжини табу-списку (списку заборон) – L .

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для кількості факторів $k \leq 7$.

Недоліки методу: наближений; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат; однокритеріальна оптимізація.

20. Метод вкладених розбивок. Суть метода [32] полягає в знаходженні мінімального значення критерію оптимізації при переходах від i -ого до $(i+4)$ включно, де i – номер рядка початкової матриці планування експерименту. На основі визначеного мінімального переходу відповідна строчка матриці планування експерименту додається в якості першої (або наступної) у оптимальний план. При цьому знайдений перехід виключається з подальшого аналізу. Кількість ітерацій задається дослідником.

Переваги методу: висока швидкодія; працездатність методу ефективна для кількості факторів $k > 3$.

Недоліки методу: наближений; випадковість пошуку, що може значно вплинути на кінцевий результат; однокритеріальна оптимізація.

Висновок. Таким чином, основні результати проведеного аналізу 20 методів оптимального планування багатфакторного експерименту за вартісними та часовими показниками подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів оптимального планування БФЕ за вартісними та часовими показниками

| № з/п | Назва методу | Точність методу | Кількість факторів | Кількість критеріїв оптимізації | Вид плану БФЕ |
|-------|---|-----------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 1 | Метод аналізу перестановок (повний перебір) | Точний | $k \leq 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 2 | Метод гілок та меж | Точний | $k \leq 7$ $k \leq 5$ | 2 | ПФЕ, ДФЕ ОЦКП, РЦКП |
| 3 | Метод на основі серійних послідовностей | Точний | $k \leq 16$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ ОЦКП, РЦКП |
| 4 | Комбінаторно-графовий метод | Точний | $k \leq 7$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 5 | Метод «стрибаючих жаб» | наближений | $k \leq 7$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 6 | Метод мавп'ячого пошуку | наближений | $k \leq 7$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 7 | Метод пошуку «косяком риб» | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 8 | Метод рою частинок | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 9 | Метод на основі генетичних алгоритмів | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 10 | Метод на основі мурашиних алгоритмів | наближений | $k \leq 10$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 11 | Метод послідовного наближення | наближений | $k \leq 10$ | 2 | ОЦКП, РЦКП |
| 12 | Композиційний метод | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 13 | Метод на основі жадібного алгоритму | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 14 | Метод імітації відпалу | наближений | $k \leq 5$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 15 | Симплекс-метод | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 16 | Метод випадкового пошуку | наближений | $k \leq 6$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ ОЦКП, РЦКП |
| 17 | Метод на основі коду Грея | наближений | $k \leq 5$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 18 | Метод найближчого сусіда | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 19 | Метод табу-пошуку | наближений | $k \leq 7$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |
| 20 | Метод вкладених розбивок | наближений | $k > 3$ | 1 | ПФЕ, ДФЕ |

Аналіз табл. 1 дає можливість сформулювати для дослідника практичні рекомендації щодо використання методів оптимізації БФЕ за вартісними та часовими показниками:

для дворівневих планів ПФЕ та ДФЕ при кількості факторів $k \leq 3$ доцільно використовувати базовий метод – аналіз перестановок;

для дворівневих планів ПФЕ та ДФЕ при кількості факторів $3 < k \leq 7$ ефективним буде використання точних методів: методу гілок та меж або методу на основі серійних послідовностей;

для дворівневих планів ПФЕ та ДФЕ при кількості факторів $7 < k \leq 16$ при оптимізації найкращим буде використання методу на основі серійних послідовностей. Цей метод також буде ефективним для трирівневих планів ПФЕ та ДФЕ з кількістю факторів $k \leq 11$.

для ОЦКП та РЦКП при кількості факторів $k \leq 5$ доцільним буде використання методу гілок та меж, а при $5 < k \leq 10$ – методу послідовного наближення або методу на основі мурашиних алгоритмів;

варто зауважити, що оскільки верхня межа кількості факторів з точки зору ефективності застосування наближених методів не є повністю дослідженою (наприклад, метод на основі генетичних алгоритмів, вкладених розбивок тощо), то для $k > 3$ вони будуть давати оптимальні результати з більш високою швидкістю, ніж точні;

метод на основі коду Грея не потребує розробки програмного забезпечення та дозволяє будувати плани БФЕ вручну.

Згідно проведеного дослідження **подальшими напрямками розвитку** оптимального планування експерименту за часовими та вартісними показниками можуть бути:

– класифікація методів за основними для експериментатора характеристиками, а саме: кількістю факторів дослідження, точністю, кількістю критеріїв оптимізації, видами плану експерименту;

– розробка та удосконалення методів двокритеріальної оптимізації за часовими та вартісними показниками;

– розробка та удосконалення наближених методів для ОЦКП, РЦКП та багаторівневих планів БФЕ;

– порівняльний аналіз швидкодії наближених методів для $k > 7$.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кошевой Н. Д. Оптимальное планирование эксперимента для объектов с различным количеством уровней факторов [Текст] / Н. Д. Кошевой, В. А. Дергачев, Е. А. Сухобрус, Е. М. Костенко // Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2012. – Вип. 35. – С. 98–100.

2. Кошевой Н. Д., Бестань С. Г., Дергачев В. А. Применение комбинаторного анализа при выборе оптимальных планов многофакторного эксперимента. Теорія і практика перебудови економіки: зб. наукових праць ЧІПІ. – Черкаси, 2001. – С. 224–227.

3. Кошевой Н. Д., Бурлеев О. Л., Костенко Е. М. Применение метода ветвей и границ для оптимизации многофакторных планов эксперимента [Текст]. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 1(42). – С. 67–70.

4. Кошевой Н. Д., Бурлеев О. Л., Костенко Е. М. Оптимальное планирование эксперимента с введением ограничения по дополнительному критерию [Текст]. Вісник Сумського державного університету. – 2010. – № 3. – Т. 2. – С. 63–67.

5. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Чуйко А. С. Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка [Текст]. Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – Вип. 25. – К., 2010. – С. 95–101.

6. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Чуйко А. С. Алгоритм оптимизации композиционных планов второго порядка методом ветвей и границ [Текст]. Математичне моделювання. – 2010. – № 2(23). – С. 14–18.

7. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Чуйко А. С. Применение метода ветвей и границ для двухпараметрической оптимизации композиционных планов второго порядка [Текст]. Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – Вип. 32. – К., 2011. – С. 124–131.

8. Костенко О. М. Оптимізація планів експериментів в умовах обмежених матеріальних та часових ресурсів. Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2015. – № 3. – С. 124–131.

9. Кошевой Н. Д., Павлик В. В., Сытник В. В. Комбинаторно-графовый метод построения оптимальных планов многофакторного эксперимента. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2015. – № 4. – С. 74–80.

10. 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.
11. Кошовий М. Д., Муратов В. В. Застосування алгоритму мавп'ячого пошуку для оптимізації планів повного факторного експерименту. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського Національного університету імені Тараса Шевченка*, 2019. – № 61. – С. 61–70.
12. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Muratov V. V. Application of the fish search method for optimization plans of the full factor experiment. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. no 2. P. 44 - 50. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-5.
13. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода роя частиц для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2017. – Вип. 55. – С.46–51.
14. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма оптимизации роем частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. - 2018. - № 1. - С. 41-49. DOI: 10.15588 / 1607-3274-2018-1-1
15. Кошевой Н. Д., Сухобрус Е. А. Оптимальное планирование эксперимента с использованием генетических алгоритмов. *Математичне моделювання*. - 2013. - № 2. - С. 36-40.
16. Koshevoy N. D., Gordienko V. A., Sukhobrus Ye. A., Optimization for the design of technological processes. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, no 15. P. 1383–1386. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.60.
17. Кошевой Н. Д., Чуйко А. С. Применение муравьиных алгоритмов для оптимизации факторных планов эксперимента. *Математичне моделювання*. – 2013. – № 1. – С. 92–97.
18. Кошевой М. Д., Костенко О. М., Чуйко О. С. Алгоритм оптимізації композиційних планів експерименту методом послідовного наближення [Текст]. *Электротехнические и компьютерные системы*. – К.: Техника, 2012. – № 6 (82). – С. 249–254.
19. Методология оптимального по стоимостным и временным затратам планирования эксперимента [Текст]: монография / Н. Д. Кошевой та інш. – Полтава: Полтавская государственная аграрная академия. – 2017. – 232 с. ISBN 978-966-2088-79-3.
20. Кошевой Н. Д., Бельмега А. В. Применение жадного алгоритма для оптимизации многофакторных планов эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. - 2014. - Вип. 47. - С. 29-37.
21. Кошевой Н. Д., Бельмега А. В., Чистикова З. Э. Применение алгоритма имитации отжига для оптимизации многофакторных планов эксперимента. *Системы обработки информации*. – 2015. – №6(131). – С. 103-106.
22. Кошевой, Н. Д. Сухобрус Е. А. Оптимальное планирование эксперимента на основе симплекс-метода. *Математичне моделювання*. – Дніпродзержинськ: Дніпродзержинський державний технічний університет, 2012. – Вип. 1 (26). – С. 27-30.
23. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма случайного поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2015. – Вып. 70. – С. 255–262.
24. Кошевой Н. Д., Кошевая И. И., Раскин Л. Г. Синтез оптимальных по стоимостным или временным затратам планов полного факторного эксперимента. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. - 2016. - № 2. - С. 46–50.
25. 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.
26. Koshevoy N., Cherepashuk G., Kalashnikov Ye., Zabolotnyi O., Siroklyn V. Development, research and optimization of weight measuring system. *Ukrainian metrological journal*. 2021. no 3, P.43 - 49. DOI:10.24027/2306-7039.3.2021.241640.
27. Koshevoy N., Zabolotnyi O., Tsekhevskyi M., Koshevaya I., Kostenko E. Research and optimization of the eddy current transducer of dielectric coating thickness on metal surfaces of products. *Ukrainian metrological journal*. 2020. no 2, P.33 - 39. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2020.208935.
28. Кошевой Н. Д., Заболотный А. В., Кошевая И. И. Синтез оптимальных по стоимостным или временным затратам планов дробного факторного эксперимента. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2016. – Вып. 72. – С. 177-182.

29. Koshevoy N. D., Dergachov V. A., Pavlyk A.V., Zabolotnyi O. V., Koshevaya I. I., Kostenko E. M. The method of building plans of multifactorial experiments with minimal number of factor levels measurements and optimal by cost(time) expenses. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. no 4, P.55-64. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-4-6.
30. Кошевой Н. Д., Чистикова З. Э., Бельмега А. В. Оптимизация многофакторных планов эксперимента с применением алгоритма имитации отжига и ближайшего соседа. *East European Scientific Journal*. – Warsaw, Poland, 2016. – Vol. 2 (6). – С. 115-118.
31. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма табу-поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Зб. наук. пр. Військ. ін-ту Київськ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. – 2016. – № 52. – С.116-122.
32. Кошевой Н. Д., Стадник А. С. Оптимальное планирование эксперимента в условиях ограниченных ресурсов. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2016. – Вип. 54. – С. 230-235.
33. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Beliaieva A. A. Comparative analysis of optimization methods in the investigation of a weigh-measuring system and thermoregulatory. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2018. no 4, P.179-187. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-17.
34. Кошевой Н. Д., Бурлеев О. Л., Костенко Е. М. Сравнительный анализ методов оптимизации многофакторных планов эксперимента [Текст]. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. – Вып. 150. – Х.: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники, 2010. – С. 60–64.
35. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Муратов В. В., Крюков А. М., Биленко А. И., Морозов А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента. *Радіоелектроніка, інформатика, управління: науковий журнал*. – 2020. – № 1. – С. 54-62. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-6.
36. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Чуйко А. С. Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации композиционных планов второго порядка [Текст]. *Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. – Вип. 30. – К., 2011. – С. 40–45.
37. Кошевой Н. Д., Кошевая И. И., Костенко Е. М. Сравнительный анализ методов синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов многофакторного эксперимента [Текст]. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – К., 2016. – №54. – С.33-39.
38. Кошовий М. Д., Костенко О. М., Дергачов В. А., Бурлеев О. Л., Чуйко О. С. Програмні засоби для оптимізації планів експерименту за часовими і вартісними витратами. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. – Д.: НГУ, 2011. – Вип. №36. – Т. 1. – С.76-82.
39. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента [Текст]: 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.
40. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А.С. Оптимизация комбинаторных планов эксперимента. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. – 2013. – № 43. – С. 26-33.
41. Юхименко Б. И. Модификации метода ветвей и границ для решения задач целочисленного линейного программирования и их эффективность. *Информатика та математичні методи в моделюванні*. – 2015. – Т. 5, № 1. – С. 84-91.
42. Elbeltagi E., Hegazy T., Grierson D. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms // *J. Advanced Engineering Informatics*, 2005, no. 19, pp. 43–53.
43. Zhao R., Tang W. Monkey Algorithm for Global Numerical Optimization. *Journal of Uncertain Systems*. – 2008. – V.2, no.3, pp.165-176.
44. Bastos-Filho C. J. A., Lima-Neto F. B., Lins A. J. C. C., Nascimento A. I. S., Lima M. P., Fish school search // *Nature-Inspired Algorithms for Optimization*. *SCI. Springer. Heidelberg*, 2009. Vol.193, pp. 261-277.
45. Larran Aga P., Kuijpers C. M. H., Murga R. H., Inza I. Genetic, Dizdarevic S. Algorithms for the Travelling Salesman Problem: A Review of Representations and Operators. *Artificial Intelligence Review 13* – Netherlands: Kluwer Academic Publishers. – 1999 – pp. 129 - 170.
46. Shtovba S. Ant Algorithms: Theory and Applications. *Programming and Computer Software*, 2005. vol.31, pp. 167-178. DOI: 10.1007/s11086-005-0029-1.
47. Afaq A. Another Perspective in Generating and Using Gray Code-word. *Elektrika: Journal of Electrical Engineering*, 2007. vol.9, no 2, pp. 49-55.

48. Zhang Z. Introduction to machine learning: k-nearest neighbors. *Ann Transl Med.* 2016; vol.4, №11, pp. 218-224. DOI: 10.21037/atm.2016.03.37.

REFERENCES:

1. Koshevoy, N. D. Optimalnoe planirovanie eksperimenta dlya ob'ektov s razlichnyim kolichestvom urovney faktorov / N. D. Koshevoy, V. A. Dergachev, E. A. Suhobrus, E. M. Kostenko // *Zb. nauk. pr. vIysk. In-tu KiYivskogo nats. un-tu Im. Tarasa Shevchenka.* – K.: VIKNU, 2012. – Vip. 35. – P. 98–100.
2. Koshevoy, N. D., Bestan, S. G. Dergachev, V. A. Primenenie kombinatornogo analiza pri vyibore optimalnykh planov mnogofaktornogo eksperimenta. *Teoriya I praktika perebudovi ekonomiki: zb. naukovih prats ChITI.* – Cherkasi, 2001. – pp. 224–227.
3. Koshevoy, N. D., Burleev, O. L., Kostenko, E. M. Primenenie metoda vetvey i granits dlya optimizatsii mnogofaktornykh planov eksperimenta. *Radioelektronni I komp'yuterni sistemi.* – 2010. – № 1(42). – pp. 67–70.
4. Koshevoy, N. D., Burleev, O. L., Kostenko, E. M. Optimalnoe planirovanie eksperimenta s vvedeniem ogranicheniya po dopolnitelnomu kriteriyu. // *Visnik Sumskogo derzhavnogo unIversitetu.* – 2010. – № 3. – T. 2. – P. 63–67.
5. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M., Chuyko, A. S. Primenenie metoda vetvey i granits dlya optimizatsii kompozitsionnykh planov vtorogo poryadka // *Zb. nauk. pr. vIysk. In-tu KiYivskogo nats. un-tu Im. Tarasa Shevchenka.* – Vip. 25. – K., 2010. – pp. 95–101.
6. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M., Chuyko, A. S. Algoritm optimizatsii kompozitsionnykh planov vtorogo poryadka metodom vetvey i granits. *Matematychni modeliuvannya.* – 2010. – № 2(23). – pp. 14–18.
7. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M., Chuyko, A. S. Primenenie metoda vetvey i granits dlya dvuhparametricheskoy optimizatsii kompozitsionnykh planov vtorogo poryadka // *Zb. nauk. pr. viisk. in-tu Kyivskoho nats. un-tu im. Tarasa Shevchenka.* – Vyp. 32. – K., 2011. – pp. 124–131/.
8. Kostenko O. M. Optyimizatsiia planiv eksperimentiv v umovakh obmezhenykh materialnykh ta chasovykh resursiv. // *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii.* – 2015. – № 3. – pp. 124–131.
9. Koshevoy, N. D., Pavlik, V. V., Syitnik, V. V. Kombinatorno-grafovyyi metod postroeniya optimalnykh planov mnogofaktornogo eksperimenta. *Radioelektronni i kompiuterni systemy.* – 2015. – № 4. – pp. 74–80.
10. 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.
11. Koshovyi, M. D., Muratov, V. V. Zastosuvannya alhorytmu mavpiachoho poshuku dlia optyimizatsii planiv povnoho faktornoho eksperimentu // *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho Natsionalnogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka,* 2019. – № 61. – pp. 61–70.
12. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M., Muratov, V. V. Application of the fish search method for optimization plans of the full factor experiment. *Radio Electronics, Computer Science, Control.* 2020. no 2. P. 44 - 50. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-5.
13. Koshevoy, N. D., Belyaeva, A. A. Primenenie metoda roya chastits dlya optimizatsii trehurovnevnykh planov mnogofaktornogo eksperimenta // *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka.* – 2017. – Vyp. 55. – pp.46–51.
14. Koshevoy N. D., Belyaeva A. A. Primenenie algoritma optimizatsii roem chastits dlya minimizatsii stoimosti provedeniya mnogofaktornogo eksperimenta. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia.* - 2018. - № 1. - pp. 41-49. DOI: 10.15588 / 1607-3274-2018-1-1.
15. Koshevoy, N. D., Suhobru, s E. A. Optimalnoe planirovanie eksperimenta s ispolzovaniem geneticheskikh algoritmov. *Matematychni modeliuvannya.* - 2013. - № 2. - pp. 36-40.
16. Koshevoy, N. D., Gordienko, V. A., Sukhobrus, Ye. A. Optimization for the design of technological processes. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2014. Vol. 73, no 15. P. 1383–1386. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.60.
17. Koshevoy, N. D., Chuyko, A. S. Primenenie muravinykh algoritmov dlya optimizatsii faktornykh planov eksperimenta. *Matematychni modeliuvannya.* – 2013. – № 1. – pp. 92–97.
18. Koshevoy, M. D., Kostenko, O. M., Chuyko, O. S. Algoritm optimIzatsIYi kompozitsIynih planIv eksperimentu metodom poslIdovnogo nablIzhennya. *Электротехнические у компиутерные системы.* – K.: Tekhnika, 2012. – № 6 (82). – pp. 249–254.

19. Metodologiya optimalnogo po stoimostnyim i vremennym zatratam planirovaniya eksperimenta: monografiya / N. D. Koshevoy ta Insh. – Poltava: Poltavskaya gosudarstvennaya agrarnaya akademiya. – 2017. – 232 p. ISBN 978-966-2088-79-3.
20. Koshevoy N. D., Belmega A. V. Primenenie zhadnogo algoritma dlya optimizatsii mnogofaktornykh planov eksperimenta // Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. - 2014. - Vyp. 47. - pp. 29-37.
21. Koshevoy N. D., Belmega A. V., Chistikova Z. E. Primenenie algoritma imitatsii otzhiga dlya optimizatsii mnogofaktornykh planov eksperimenta. Systemy obrobky informatsii. – 2015. – №6(131). – pp. 103-106.
22. Koshevoy, N. D. Cuhobrus E. A. Optimalnoe planirovanie eksperimenta na osnove simpleks-metoda. Matematichne modelyuvannya. – DnIprodzerzhinsk: DnIprodzerzhinskiy derzhavniy tehnlchniy unIversitet, 2012. – Vip. 1 (26). – pp. 27-30.
23. Koshevoy N. D., Belyaeva A. A. Primenenie algoritma sluchaynogo poiska dlya minimizatsii stoimosti provedeniya mnogofaktornogo eksperimenta. Otkrytyie informatsionnyie i kompyuternyie integrirovannyye tehnologii. – 2015. – Vyip. 70. – pp. 255–262.
24. Koshevoy N. D., Koshevaya I. I., Raskin L. G. Sintez optimalnykh po stoimostnyim ili vremennym zatratam planov polnogo faktornogo eksperimenta. RadIoelektronI I komp'yuternI sistemi. 2016. Pp. 46–50.
25. 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.
26. Koshevoy N., Cherepashuk G., Kalashnikov Ye., Zabolotnyi O., Siroklyn V. Development, research and optimization of weight measuring system. Ukrainian metrological journal. 2021. no 3, P.43 - 49. DOI:10.24027/2306-7039.3.2021.241640.
27. Koshevoy N., Zabolotnyi O., Tsekhovskiy M., Koshevaya I., Kostenko E. Research and optimization of the eddy current transducer of dielectric coating thickness on metal surfaces of products. Ukrainian metrological journal. 2020. no 2, P.33 - 39. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2020.208935.
28. Koshevoy N. D., Zabolotniy A. V., Koshevaya I. I. Sintez optimalnykh po stoimostnyim ili vremennym zatratam planov drobnogo faktornogo eksperimenta. Otkrytyie informatsionnyie i kompyuternyie integrirovannyye tehnologii. – 2016. – Vyip. 72. – pp. 177-182.
29. Koshevoy N. D., Dergachov V. A., Pavlyk A. V., Zabolotnyi O. V., Koshevaya I. I., Kostenko E. M. The method of building plans of multifactorial experiments with minimal number of factor levels measurements and optimal by cost(time) expenses. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2020. no 4, P.55-64. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-4-6.
30. Koshevoy N. D., Chistikova Z. E., Belmega A. V. Optimizatsiya mnogofaktornykh planov eksperimenta s primeneniem algoritma imitatsii otzhiga i blizhayshego soseda. East European Scientific Journal. – Warsaw, Poland, 2016. – Vol. 2 (6). – pp. 115-118.
31. Koshevoy N. D., Belyaeva A. A. Primenenie algoritma tabu-poiska dlya minimizatsii stoimosti provedeniya mnogofaktornogo eksperimenta // Zb. nauk. pr. VIysk. In-tu KiYivsk. nats. un-tu Im. Tarasa Shevchenka. – 2016. – 5№2. – pp.116-122.
32. Koshevoy N. D., Stadnik A. S. Optimalnoe planirovanie eksperimenta v usloviyah ogranichennykh resursov // ZbIrnik naukovykh prats VIyskovogo Institutu KiYivskogo natsIonalnogo unIversitetu Imeni Tarasa Shevchenka. – 2016. – Vip. 54. – pp. 230-235.
33. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Beliaieva A. A. Comparative analysis of optimization methods in the investigation of a weigh-measuring system and thermoregulatory. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2018. no 4, P.179-187. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-17.
34. Koshevoy N. D., Burleev O. L., Kostenko E. M. Sravnitelnyiy analiz metodov optimizatsii mnogofaktornykh planov eksperimenta. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i priboryi avtomatiki. – Vyip. 150. – H.: Hark. nats. un–t radioelektroniki, 2010. – pp. 60–64.
35. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Muratov V. V., Kryukov A. M., Bilenko A. I., Morozov A. A. Sravnitelnyiy analiz metodov optimizatsii po stoimostnyim (vremennym) zatratam planov polnogo faktornogo eksperimenta. RadIoelektronIka, Informatika, upravIlnnya: naukoviy zhurnal. – 2020. – № 1. – S. 54-62. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-6.
36. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Chuyko A. S. Sravnitelnyiy analiz algoritmov optimizatsii kompozitsionnykh planov vtorogo poryadka //Zb. nauk. pr. vIysk. In–tu KiYivskogo nats. un–tu Im. Tarasa Shevchenka. – Vip. 30. – K., 2011. – pp. 40–45.
37. Koshevoy N. D., Koshevaya I. I., Kostenko E. M. Sravnitelnyiy analiz metodov sinteza optimalnykh po stoimostnyim (vremennym) zatratam planov mnogofaktornogo eksperimenta. ZbIrnik // naukovykh prats.

Vl'skovogo Institutu KiYiv'skogo natsionalnogo un'iversitetu ImenI Tarasa Shevchenka. – K., 2016. – №54. – pp.33-39.

38. Koshovyi M. D., Kostenko O. M., Derhachov V. A., Burliev O. L., Chuiko O. S. Prohramni zasoby dl'ia optymizatsii planiv eksperymentu za chasovymy i vartisnymy vytratamy // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu. – D.: NHU, 2011. – Vyp. №36. – T. 1. –pp.76-82.

39. Koshevoy N. D., Kostenko E. M. Optimalnoe po stoimostnym i vremennyim zatratam planirovanie eksperimenta [Tekst]: monografiya. Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «Hark. aviats. in-t». – H.: HAI; Poltava: Shevchenko R. V., 2013. – 316 pp. ISBN 978-966-8798-89-4.

40. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Chuyko A. S. Optimizatsiya kombinatornykh planov eksperimenta. // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo hrn'ichoho un'iversitetu. – 2013. – № 43. – pp. 26-33.

41. Yuhimenko B. I. Modifikatsii metoda vetvey i granits dlya resheniya zadach tselochislennogo lineynogo programmirovaniya i ih effektivnost. Informatika ta matematichni metodi v modelyuvanni. – 2015. – T. 5, № 1. – pp. 84-91.

42. Elbeltagi E., Hegazy T., Grierson D. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms // J. Advanced Engineering Informatics, 2005, no. 19, pp. 43–53.

43. Zhao R., Tang W. Monkey Algorithm for Global Numerical Optimization. Journal of Uncertain Systems. – 2008. – V.2, no.3, pp.165-176.

44. Bastos-Filho C. J. A., Lima-Neto F. B., Lins A. J. C. C., Nascimento A. I. S., Lima M. P., Fish school search // Nature-Inspired Algorithms for Optimization. SCI. Springer. Heidelberg, 2009. Vol.193, pp. 261-277.

45. Larran Aga P., Kuijpers C. M. H., Murga R. H., Inza I. Genetic, Dizdarevic S. Algorithms for the Travelling Salesman Problem: A Review of Representations and Operators. Artificial Intelligence Review 13 – Netherlands: Kluwer Academic Publishers. – 1999 – pp. 129 - 170.

46. Shtovba S. Ant Algorithms: Theory and Applications. Programming and Computer Software, 2005. vol.31, pp. 167-178. DOI: 10.1007/s11086-005-0029-1.

47. Afaq A. Another Perspective in Generating and Using Gray Code-word. ElektriKa: Journal of Electrical Engineering, 2007. vol.9, no 2, pp. 49-55.

48. Zhang Z. Introduction to machine learning: k-nearest neighbors. Ann Transl Med. 2016; vol.4, №11, pp. 218-224. DOI: 10.21037/atm.2016.03.37.

Doctor of Technical Science, Professor Koshevoy M. D., PhD Burliev O. L.
ANALYSIS OF METHODS FOR OPTIMAL DESIGN OF MULTIFACTOR EXPERIMENT IN
TERMS COST AND TIME CRITERIA

The object of research is the analysis of the state of development of methods of optimal planning of multifactorial experiment on cost and time indicators. The subject of the research is the methods of optimization of multifactor experiment plans in terms of cost and time indicators. The objective: the development of practical recommendations for the application of existing optimization methods of multifactorial experiment plans in terms of cost and time criteria based on their comparative analysis. The tasks are the comparing of optimization methods of multifactorial experiment plans by characteristics: the allowable number of factors for effective optimization, type of plan, accuracy of the method, the number of optimization criteria, speed; development of practical recommendations for the use of these methods; the determine of directions for further development of the research topic. Methods: method of comparative analysis, optimization methods based on the study of nature, combinatorial optimization methods, graph optimization methods, approximate optimization methods. The results of study. The 20 methods of multifactorial experiment plans in terms of cost and time criteria are analyzed. The 6 practical recommendations for their application in the range of factors number $2 < k \leq 16$ are given. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results is the improved comparative analysis of existing methods of multifactorial experiment plans based on 5 characteristics in terms of the experimenter's choice, namely: the allowable number of factors for effective optimization, type of plan, method accuracy, number of optimization criteria; speed-code. In the future, it is planned to study the classification of methods of multifactorial experiment plans, the development and improvement of two-criteria optimization methods for cost and time characteristics, the speed analysis of approximate optimization methods for $k > 7$ and their improvement.

Keywords: design of multifactorial experiment, accurate optimization methods, approximate optimization methods, optimization criteria, speed, two-criteria optimization.