

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Беляєва Анна Андріївна

УДК 519.24

ДИСЕРТАЦІЯ

Синтез оптимальних за вартісними витратами планів експериментів
для дослідження технологічних процесів і систем

151-Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

15-Автоматизація та приладобудування

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора філософії з інформаційно-вимірювальних систем

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А. А. Беляєва

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Кошовий Микола Дмитрович,
д.т.н., проф., лауреат Державної премії
України в галузі науки і техніки

Харків - 2020

АНОТАЦІЯ

Беляєва А. А. Синтез оптимальних за вартісними витратами планів експериментів для дослідження технологічних процесів і систем. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151- «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2019.

У дисертаційній роботі було розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка полягає у зменшенні часових і вартісних витрат на проведення експериментів при дослідженні комп'ютерних систем і технологічних процесів за рахунок розроблення та впровадження методів і програмних засобів для оптимізації планів багатфакторного експерименту.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами, а також сформульовано мету і завдання дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення результатів, отриманих під час виконання дослідження.

Оскільки задача оптимізації планів експериментів за вартісними витратами є NP-повною, тобто для свого рішення потребує часу і великої кількості обчислень, швидко зростаючих із збільшенням розмірності задачі, тому повний перебір усіх можливих варіантів рішення є складним. При синтезі оптимального плану експерименту з кількістю факторів більше чотирьох виникає ще й проблема тривалості його побудови.

У зв'язку з цим необхідно знаходити рішення за допомогою наближених методів, наприклад, таких як методи побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на використанні випадкового пошуку, табу-пошуку, рою часток для оптимізації цих планів.

У першому розділі проаналізовано сучасні методи планування експерименту, які можна використовувати для оптимізації планів багатфакторного експерименту за часовими (вартісними) витратами: повного перебору, випадкового пошуку, гілок і меж, найближчого сусіда, жадібного алгоритму, імітації відпаду, мурашині алгоритми, генетичні алгоритми.

Кожен із методів оптимізації, розглянутих у першому розділі, має свої переваги і недоліки. Наприклад, метод повного перебору дозволяє отримати точний результат, проте він має низьку швидкодію і для великої кількості факторів ($k > 4$) його застосування неможливе. А якщо застосовувати інші алгоритми, то можна отримати тільки наближений до оптимального план експерименту. Крім того, вони мають обмеження на кількість факторів k і різні показники швидкодії.

Для вибору найкращого методу оптимізації планів багатфакторного експерименту треба керуватися як розмірністю задачі, так і характером цільової функції. На основі порівняльного аналізу цих методів у першому розділі було сформульовано задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі запропоновано методи побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, засновані на використанні для їх оптимізації випадкового пошуку, табу-пошуку, рою часток. Також було розроблено відповідне програмне забезпечення. Основні результати другого розділу відображено в [10 - 16].

Третій розділ містить практичні результати застосування методів побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, основаних на використанні випадкового пошуку, табу-пошуку, рою часток для оптимізації цих планів.

Зокрема розроблені методи дозволяють оптимізувати плани з кількістю факторів $k=3...7$. При дослідженні системи для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу, яка може застосовуватися для багатьох підприємств харчової, металургійної та гірничорудної промисло-

востей, було проведено оптимізацію планів експерименту для процесу вимірювання. Вартість реалізації при використанні методу рою часток дорівнює 110 ум. од. і час рахунку 0,01 с, а для оптимального плану, отриманого при повному переборі рядків, - 102 ум. од. і час рахунку 25 с. Метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту, оснований на використанні пошуку роєм часток, дає результати, трохи гірші, за метод перестановки рядків, однак має кращі показники швидкодії.

З використанням розробленого програмного забезпечення досліджували плани експерименту 3^k для вивчення шорсткості поверхні кремнію у процесах глибокого плазмохімічного травлення елементів МЕМС і методу вимірювання щільності струму гальванічних ванн із мірними датчиками. Оптимізований план експерименту при дослідженні шорсткості поверхні кремнію має вартість реалізації 142 ум. од., а вихідний план - 370 ум. од. Виграш за вартістю проведення експерименту становить 2,61 раза, а при застосуванні методу гілок і меж - 1,28 раза. За умови використання методу рою часток на оптимізацію плану необхідно витратити 0,33 с, а на реалізацію методом гілок і меж - 137 хв.

Вартість реалізації оптимального плану при дослідженні методу вимірювання щільності струму гальванічних ванн має значення 85 ум. од., а вартість реалізації вихідної матриці планування - 174 ум. од., тоді як максимальна вартість - 225 ум. од. Таким чином, виграш за вартістю реалізації становить 2,05 раза порівняно з вихідним планом експерименту, а порівняно з планом максимальної вартості - у 2,64 раза.

Також з використанням розроблених методів було досліджено композиційні плани другого порядку для процесу термічної обробки пористих матеріалів. Виграш за вартістю реалізації експерименту при використанні методу рою часток становив 5,92 раза, у той час як при застосуванні методів: табу-пошуку – 5,49 раза, гілок і меж – 5,47 раза, послідовного наближення – 5,47 раза.

Пошук оптимального або близького до оптимального плану експерименту, отриманого методом побудови оптимальних за вартісними (часовими) витрата-

ми планів багатофакторного експерименту, основанийого на використанні оптимізації роєм часток, реалізується за суттєво менший час рахунку, ніж при методі гілок і меж та методі випадкового пошуку. Виграш у вартості реалізації планів експериментів при використанні даного методу значно більший, ніж при методах випадкового пошуку і табу-пошуку. Застосування розробленого програмного забезпечення, основанийого на використанні методів випадкового пошуку, табу-пошуку і рою часток, ефективно при кількості факторів $k \geq 3$. Основні результати третього розділу відображено в [2 - 9,24 - 30].

Четвертий розділ присвячено розробленню ваговимірювальної системи, яка належить до засобів для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу та може застосовуватися для багатьох підприємств харчової, металургійної та гірничорудної промисловостей. На точність вимірювання системи впливає безліч факторів. Одним з найважливіших факторів є температура. Для підвищення точності вимірювань було запропоновано волоконно-оптичний датчик вологості й температури, два терморегулятори, два біметалевих датчики температури.

Удосконалено ваговимірювальну систему шляхом введення до її складу терморегулятора, до якого підключено датчик температури.

Запропонований волоконно-оптичний датчик може застосовуватися для вимірювання температури у ваговимірювальній системі. Оскільки додавання ще одного світловоду для вимірювання показників температури контрольованого середовища приводить до вилучення взаємного впливу вимірюваних параметрів на самі результати вимірювання, так як вимірювання вологості та температури відбувається через окремі незалежні канали.

Також для ваговимірювальної системи було розроблено терморегулятор, що складається з двох зустрічно-паралельно включених тиристорів і нагрівача, а також резисторів у колі керуючих електродів. Застосування біметалевого термометра, включеного між резисторами, дозволяє роботу з термометром зробити безпечною, а також підвищує його надійність.

Можна застосовувати розроблений біметалевий датчик температури, що має в своєму складі чутливий елемент у вигляді консольно закріпленої біметалевої плоскої або скрученої у формі спіралі пластини. Вільний кінець пластини через передавальний механізм з'єднаний з валом конденсатора змінної ємності, який увімкнений у контур LC-автогенератора електричних коливань. Оскільки датчик температури є пристроєм з частотним виходом, тому він має підвищену чутливість, завадостійкість і достатньо просту сумісність з ЕОМ.

Застосування у ваговимірювальній системі нових елементів та зв'язків між ними дозволило підвищити точність вимірювання вагової витрати матеріалів. Основні результати четвертого розділу відображено в [1,17 - 22].

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розробленні методів синтезу оптимальних планів багатofакторного експерименту, в яких пошук таких планів реалізується шляхом перестановки стовпців матриці планування, табу-пошуком, роєм часток, що дозволяє будувати оптимальні комбінаторні плани без повного перебору варіантів перестановок дослідів. Також отримав подальший розвиток порівняльний аналіз розроблених та існуючих методів оптимізації планів багатofакторного експерименту.

Практична цінність розроблених програмних продуктів полягає в можливості застосування їх на практиці для моделювання різних технологічних процесів і приладів. Результати теоретичних, а також експериментальних досліджень дисертації використано в практиці промислових підприємств і організацій, про що свідчать відповідні акти впровадження.

Ключові слова: планування експерименту, вартість, табу-пошук, випадковий пошук, рій часток, ваговимірювальна система, оптимізація, терморегулятор, біметалевий датчик, волоконно-оптичний датчик.

Список публікацій здобувача:

1. Харченко А. А. Устройство для проведения многофакторного эксперимента. *Современные научные исследования и инновации*. Май 2014. Вып. 5. - URL:<http://web.snauka.ru/issues/2014/05/32952>.

2. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма случайного поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вып. 70. С. 255-262.

3. Кошевой Н.Д., Беляева А. А. Применение алгоритма табу-поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім.Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 52. С. 116-123.

4. Кошевой Н.Д., Беляева А. А. Применение метода табу-поиска для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вып. 73. С.87-93.

5. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода табу-поиска для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 53. С. 85-91.

6. Кошевой Н.Д., Беляева А.А. Применение метода роя частиц для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*: зб. наук. пр. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Вип. 1(81). С. 69-75.

7. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода роя частиц для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2017. Вип. 55. С. 46-51.

8. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма оптимизации ро-ем частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Радиоелектроника, інформатика, управління*. Запоріжжє: ЗНТУ, 2018. Вип. 1 (44). С. 41-49. (Web of Science)

9. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследованиии весоизмерительной системы и терморегулятора. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запорожье: ЗНТУ, 2018. Вип. 4 (47). С. 179-187. (Web of Science)

10. Комп'ютерна програма «Програма формування каталогів оптимальних планів багатofакторного експерименту» /А. А. Харченко. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №52996. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 09.01.2014.

11. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатofакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63466. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 06.01.2016.

12. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатofакторного експерименту з використанням алгоритму випадкового пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63747. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 22.01.2016.

13. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №68266. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

14. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатofакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №68265. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

15. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №71243. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

16. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатофакторного експерименту з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №71242. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

17. Терморегулятор: пат. 121097 Україна: МПК G05D 23/19. № U201705879; заявл. 12.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22.

18. Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури: пат. 122987 Україна: МПК G02B 6/00; G01N19/10(2006.01); G01K 5/00. № U 201705818; заявл. 12.06.2017; опубл. 12.02.2018, Бюл. №3.

19. Біметалевий датчик температури: пат. 128271 Україна: МПК G01K 7/34; G01R 5/00 (2006.01). №U 201803152; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17.

20. Терморегулятор: пат. 126339 Україна: МПК G05D 23/19 (2006.01). № U 201801516; заявл. 15.02.2018; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

21. Біметалевий датчик температури: пат. 129594 Україна: МПК G01K 7/34 (2006.01). №U 201803081; заявл. 26.03.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. №21.

22. Ваговимірювальна система: пат. 129696 Україна: МПК G01F 11/02 (2006.01). № U 201804607; заявл. 26.04.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

23. Харченко А. А. Оптимальные планы многофакторного эксперимента. *Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении: тез. докладов* Харьков:ХАИ, 2014. – С. 41.

24. Кошовий М. Д., Беляєва А. А. Дослідження режимів роботи оператора радіолокаційної системи (РЛС). *Тези доповідей XII Міжнародної науково-*

практичної конференції «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє» /за заг. редакцією В. В. Балабіна. – Київ:ВІКНУ,2016. С. 52.

25. Кошовий Н. Д., Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторного эксперимента. *Тезисы докладов XIV Международного научно-технического семинара «Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (УМ-2017)»*. Болгария, Созополь,2017. С. 58.

26. Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании терморегулятора. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017»*: збірник матеріалів конференції. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Том 2. С. 106.

27. Беляева А. А. Оптимизация планов экспериментов для исследования процесса термической обработки пористого материала. *Одинадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси (ІРТК-2018)»* :зб. тез. Київ: НАУ, 2018. С. 214-216.

28. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Исследование прибора для измерений влажности сыпучих материалов. *XV Международный научно-технический семинар «Неопределенность измерений:научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (УМ-2018)»* : тез.докладов. Болгария, Созополь, изд. «Софттрейд», 2018. С. 22.

29. Koshevoy N. D., Beliaieva A. A., Rozhnova T.G. Optimal planning methods for measurements in limited material resources conditions. *28th International scientific symposium «Metrology and metrology assurance 2018»*: Proceedings - Technical University of Sofia Publishing house of the Technical University of Sofia, Prepress Softtrade, 130 Issues–September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria. P. 327-330.

30. Беляєва А. А. Оптимізація технологічних процесів виробництва електронних пристроїв. *Міжнародний науковий симпозіум «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РІШЕННЯ»*. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи):

праці міжнар. наук.-практ. конф., 15 - 20 квітня 2019 р., Ужгород : ДВНЗ «Ужгородський національний університет». С. 161-162.

ABSTRACT

Beliaieva A.A. Synthesis of cost-optimal plans of experiments for the study of technological processes and systems. - Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy Degree in Specialty 151- "Automation and Computer-Integrated Technologies" - National Aerospace University named after M.E.Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkiv, 2019.

In the dissertation, a topical scientific and applied problem was solved, which is to reduce the time and cost of experiments in the study of computer systems and technological processes by developing and implementing methods and software to optimize plans for a multifactor experiment.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, shows the relationship of work with scientific topics, as well as formulated the purpose and objectives of the study, revealed the scientific novelty and practical significance of the results obtained during the study.

Because the task of optimizing cost plans experiments is NP-complete, that is, it requires time and a large number of calculations to grow rapidly with increasing dimensionality of the problem, so it is difficult to make a complete list of all possible solutions. When synthesizing an optimal experiment plan with more than four factors, there is also a problem of the duration of its construction.

In this regard, it is necessary to find solutions using approximate methods, for example, such as methods of constructing cost-effective (time) plans of a multivariate experiment based on the use of random search, taboo search, particle swarm to optimize these plans.

The first section analyzes the modern experiment planning methods that can be used to optimize multi-factorial plans for time (cost): complete search, random

search, branches and boundaries, nearest neighbor, greedy algorithm, simulation annealing, ant algorithms, genetic algorithms.

Each of the optimization methods discussed in the first section has its advantages and disadvantages. For example, the full batch method allows to obtain the exact result, but it has a low speed and for a large number of factors ($k > 4$) its use is not possible. And if you apply other algorithms, you can get only an approximate plan of the experiment. In addition, they have limitations on the number of factors k and different performance indicators.

In order to choose the best method for optimizing the plans of a multifactor experiment, both the dimension of the task and the nature of the objective function must be guided. Based on a comparative analysis of these methods, the tasks of the dissertation are formulated in the first section.

The second section proposes methods for constructing cost-effective (time) cost plans for a multivariate experiment, based on the use of random search, taboo search, and particle swarms to optimize them. Appropriate software has also been developed. The main results of the second section are reflected in [10 - 16].

The third section presents the practical results of applying methods for constructing cost-effective (time) cost plans for a multivariate experiment based on the use of random search, taboo search, and particle swarms to optimize these plans.

In particular, the developed methods allow to optimize plans with the number of factors $k = 3 \dots 7$. In the study of the system for measuring the weight flow of granular or powdered material, which can be used for many enterprises of the food, metallurgical and mining industries, the experimental plans for the measurement process were optimized. The cost of implementing the method of particle swarm is 110 standard units and a count time of 0.01 s, and for the optimal plan obtained with a full row search - 102 standard units and account time 25 s. The method of constructing cost-effective (time) cost plans for a multivariate experiment based on the use of particle swarms yields results that are slightly worse than the row permutation method, but has better performance.

Using the developed software, we investigated the plans of experiment 3^k to study the surface roughness of silicon in the processes of deep plasma chemical etching of MEMS elements and the method of measuring the current density of galvanic baths with dimensional sensors. An optimized experimental design for the study of the surface roughness of silicon has a cost of 142 standard units, and the original plan - 370 standard units. The gain in the cost of the experiment is 2.61 times, in the application of the method of branches and borders - 1.28 times. If the particle swarm method is used, it is necessary to spend 0.33 s for optimizing the plan and 137 min for the method of branches and boundaries.

The cost of implementing the optimal plan in the study of the method of measuring the current density of galvanic baths is 85 standard units, and the cost of implementing the original planning matrix - 174 standard units, while the maximum cost is 225 standard units. Thus, the cost of implementation is 2.05 times compared to the original plan of the experiment, and compared to the plan of maximum cost - 2.64 times.

Also using the developed methods were investigated second-order composite plans for the process of heat treatment of porous materials. The gain on the cost of the experiment using the method of particle swarm was 5.92 times, while the application of methods: taboo search - 5.49 times, branches and borders - 5.47 times, sequential approximation - 5.47 times.

Finding the optimal or close to the optimal experiment plan, obtained by the method of constructing optimal plans at the cost (time) cost of a multifactor experiment based on the use of a particle swarm optimization, is realized in a significantly shorter computation time than the branch and bound method and the random search method. The gain in the cost of implementing experiment plans is much greater than using the random search and taboo search methods. Application of the developed software based on the use methods of random search, taboo search and swarm of particles, effectively at the number of factors $k \geq 3$. The main results of the third section are reflected in [2 - 9, 24-30].

The fourth section is devoted to the development of a weighing system, which is related to the means for measuring the weight flow of granular or powdered material and can be applied to many enterprises in the food, metallurgical and mining industries. Many factors influence the accuracy of system measurement. One of the most important factors is temperature. To improve the accuracy of the measurements, a fiber optic humidity and temperature sensor, two temperature regulators, two bimetallic temperature sensors were proposed.

The weighing system has been improved by incorporating a temperature controller to which a temperature sensor is connected.

The proposed fiber optic sensor can be used to measure the temperature in a weighing system. Since the addition of another fiber to measure the temperature of the controlled environment leads to the elimination of the mutual influence of the measured parameters on the measurement results, as the measurement of humidity and temperature occurs through separate independent channels.

Also for the weighing system was developed a thermostat, consisting of two counter-parallel switched thyristors and heater, as well as resistors in the circuit of the control electrodes. The use of a bimetallic thermometer, which is included between the resistors, makes the operation of the thermometer safe and also increases its reliability.

You can use the developed bimetallic temperature sensor, which has a sensitive element in the form of a cantilever mounted bimetal flat or twisted in the form of a spiral plate. The free end of the plate is connected to a variable capacitor shaft via a gearbox, which is incorporated into the circuit of the LC oscillator. Since the temperature sensor is a device with a frequency output, it therefore has high sensitivity, noise immunity and sufficiently simple compatibility with the computer.

The use of new elements and the links between them in the weighing system has made it possible to improve the accuracy of measuring the weight consumption of materials. The main results of the fourth section are reflected in [1, 17 - 22].

The scientific novelty of the dissertation is to develop methods for the synthesis of optimal plans for a multifactor experiment, in which the search for such plans is realized by permutation the columns of the planning matrix, taboo search, a swarm of particles, which allows you to build optimal combinatorial plans without completely looking through options for permutations of experiments. A comparative analysis of the developed and existing methods of optimizing the plans of a multifactor experiment was further developed.

The practical value of the developed software products is the possibility of their application in practice for modeling of various technological processes and devices. The results of theoretical as well as experimental research of the dissertation are used in the practice of industrial enterprises and organizations, as evidenced by the relevant acts of implementation.

Keywords: experiment planning, cost, taboo search, random search, particle swarm, weighing system, optimization, thermostat, bimetal sensor, fiber optic sensor.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У ВСТУПІ	26
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОР- НИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ЗА ВАРТІСНИМИ ТА ЧАСОВИМИ ВИТРАТАМИ	31
1.1 Методи планування експерменту та аналіз спеціального програмного забезпечення для вирішення проблеми оптимізації планів БФЕ	31
1.2 Аналіз методів, що застосовуються для оптимізації за вартісними (часовими) витратами планів багаторфакторного експерименту	37
1.2.1 Метод повного перебору	37
1.2.2 Метод випадкового пошуку	38
1.2.3 Метод гілок і меж.....	40
1.2.4 Метод найближчого сусіда	42
1.2.5 Жадібний алгоритм	43
1.2.6 Метод імітації відпалу	44
1.2.7 Мурашині алгоритми.....	46
1.2.8 Генетичні алгоритми.....	49
1.3 Порівняльний аналіз методів, що застосовуються для мінімізації вартості проведення багаторфакторного експерименту	51
Резюме до розділу 1	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 1	56
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ПРОГРАМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	66
2.1 Постановка задачі оптимізації планів БФЕ	66
2.2 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багаторфакторного експерименту, оснований на перестановці стовпців матриці планування, та відповідне програмне забезпечення	68
2.3 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багаторфакторного експерименту, оснований на їх оптимізації табу-пошуком, та відповідне програмне забезпечення.....	76

2.4 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту, оснований на їх оптимізації роєм часток, та відповідне програмне забезпечення	89
Резюме до розділу 2	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 2.....	100
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНИХ ЗА ВАТРІСНИМИ (ЧАСОВИМИ) ВИТРАТАМИ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	103
3.1 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування	103
3.2 Метод оптимізації планів багатofакторних експериментів табу-пошуком	109
3.2.1 Дослідження дворівневих планів багатofакторного експерименту	109
3.2.2 Аналіз результатів оптимізації трирівневих планів багатofакторного експерименту	115
3.2.3 Оптимізація композиційних планів другого порядку	120
3.3 Метод оптимізації планів багатofакторних експериментів роєм часток	128
3.3.1 Дослідження дворівневих планів багатofакторного експерименту	128
3.3.2 Аналіз результатів оптимізації трирівневих планів багатofакторного експерименту	139
3.3.3 Оптимізація композиційних планів другого порядку	144
Резюме до розділу 3	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 3.....	155
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	159
4.1 Розробка пристрою для проведення багатofакторного експерименту...	159
4.2 Розроблення ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів та її складових частин	161

4.2.1 Розроблення ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів	161
4.2.2 Розроблення волоконно-оптичного датчика для вимірювання вологості та температури	167
4.2.3 Удосконалення терморегуляторів	172
4.2.4 Розроблення біметалевих датчиків температури.....	177
Резюме до розділу 4	183
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 4.....	185
ВИСНОВКИ.....	189
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації	191
ДОДАТОК Б Авторські свідоцтва на програмний продукт	197
ДОДАТОК В Акти впровадження.....	205
ДОДАТОК Г Патенти на корисні моделі.....	209

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Експериментальні методи знайшли широке використання як в науці, так і в промисловості. В умовах промислового експерименту головна ціль полягає в отриманні максимального об'єму об'єктивної корисної інформації про вплив окремих факторів на плин виробничого процесу за умови проведення найменшої кількості дорогих спостережень.

Складні технологічні процеси зазвичай мають велику кількість факторів, що характеризують процес, їх складний взаємозв'язок, наявність перешкод, що мають випадкову природу. Тому задачу ідентифікації і оптимізації для цього класу об'єктів можна вирішити застосувавши експериментально-статистичні методи. При цьому важливе значення має підвищення ефективності експериментального дослідження, що спрямоване на отримання адекватної математичної моделі виробничого процесу. Зараз це особливо актуально, оскільки темпи зростання фінансування на наукові дослідження значно зменшуються. Тому природно прагнення експериментатора отримати такі моделі з мінімальними часовими і вартісними витратами. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї задачі є методи планування експерименту (МПЕ), за допомогою яких можна підвищити ефективність досліджень. Суттєвими перевагами МПЕ є їх універсальність і придатність для багатьох галузей дослідження.

Планування експерименту дозволяє вирішити задачу отримання математичної моделі при мінімальних вартісних і часових витратах. Але класики теорії планування експерименту: Адлер Ю.П., Круг Г.К., Маркова О.В., Грановський Ю.В. та інші вважали, що досліди в плані експерименту рівноцінні. Однак на вартість реалізації експерименту істотно впливає порядок чергування рівнів зміни факторів. Найчастіше зустрічаються такі фактори, як температура, концентрація реагуючих речовин, час реакції, тиск та інші, які своєю чергою потребують різних витрат на зміну рівнів. Отже, необхідно синтезувати план

експерименту, який має мінімальну вартість проведення. Задача оптимізації планів експериментів за вартісними витратами є NP-повною, тобто для її рішення необхідні час і велика кількість обчислень, швидко зростаючих із збільшенням розмірності задачі. Причому повний перебір усіх можливих варіантів рішення є важкою задачею. Зі зростанням кількості факторів (k) число перетворень істотно зростає. При синтезі оптимального плану експерименту з кількістю факторів більше чотирьох виникає ще й проблема тривалості його побудови.

У зв'язку з цим необхідно знаходити оптимальні плани експерименту за допомогою наближених методів оптимізації, основаних на їх пошуку перестановкою стовпців матриці планування, табу-пошуком, роєм часток.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» у рамках НДР МОН України «Методологія удосконалення промислових паливно-енергетичних комплексів та авіаційних двигунів з використанням інформаційно-вимірювальних систем моніторингу змінних станів в умовах невизначеності вхідних даних» (ДР № 0115U000838), в якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є зменшення витрат на проведення експериментів за рахунок розроблення методів, алгоритмів і програмного забезпечення для оптимізації їх планів.

Для досягнення мети дослідження в дисертаційній роботі поставлені такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи оптимізації планів багатфакторних експериментів;
- розробити методи та програми для оптимізації планів багатфакторного експерименту з використанням їх пошуку шляхом перестановки стовпців

матриці планування, табу-пошуком, роєм часток, а також провести експериментальні дослідження цих методів;

- провести порівняльний аналіз розроблених та існуючих методів оптимізації багаторівневих планів експериментів;
- удосконалити систему для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу;
- упровадити результати досліджень у практику промислових підприємств та організацій.

Об'єкт дослідження – процес застосування розроблених методів синтезу оптимальних за вартісними витратами планів експериментів під час дослідження ваговимірювальної системи, технологічних процесів і пристроїв.

Предмет дослідження – методи і програмні продукти, що дозволяють отримувати оптимальні за вартісними (часовими) витратами плани експериментів для побудови адекватних математичних моделей приладів і технологічних процесів.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для вирішення поставлених завдань використано методи комбінаторного аналізу, оптимізації, математичної статистики, планування експерименту. Причому для отримання оптимальних як за вартістю, так і часом реалізації планів багатофакторного експерименту були розроблені методи, основані на їх пошуку шляхом перестановки стовпців матриці планування, табу-пошуком, роєм часток.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в тому, що в ній набула подальшого розвитку задача підвищення ефективності експериментальних досліджень, які використовуються для отримання адекватних математичних моделей технологічних процесів та пристроїв.

Уперше отримано:

- метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторних експериментів, який відрізняється від існуючих тим, що оп-

тимізація планів виконується табу-пошуком, що дозволяє будувати оптимальні комбінаторні плани без повного перебору варіантів перестановок дослідів;

- метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторних експериментів, який відрізняється від існуючих тим, що пошук таких планів виконується із застосуванням рою часток, що дозволяє будувати оптимальні комбінаторні плани без повного перебору варіантів перестановок дослідів.

Удосконалено метод побудови близьких до оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторних експериментів, який відрізняється від існуючих тим, що пошук таких планів реалізується шляхом перестановки стовпців матриці планування, що дає змогу скоротити час пошуку близьких до оптимальних планів експерименту.

Отримав подальшого розвитку порівняльний аналіз розроблених та існуючих методів оптимізації планів багатфакторних експериментів, що дає змогу проводити цілеспрямований вибір методу для дослідження реальних об'єктів.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що в роботі вирішено актуальну задачу отримання послідовності дослідів при проведенні багатфакторного експерименту, що забезпечує його мінімальну вартість або час реалізації.

Запропоновані методи можуть бути ефективно використані для моделювання різних технологічних процесів і приладів.

Практична цінність розроблених програмних продуктів для автоматизації процесу оптимізації планів багатфакторного експерименту з використанням методів побудови планів оптимальних за вартісними (часовими) витратами підтверджена отриманням на них свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми.

Удосконалена ваговимірювальна система, до складу якої входять розроблені волоконно-оптичний датчик вологості та температури, терморегулятори

або біметалеві датчики температури, може застосовуватися для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертації використані в практиці промислових підприємств і організацій:

- розроблені терморегулятори та біметалеві датчики температури використовуються в науково-дослідних роботах, які проводяться ДП ХПЗ ім. Т. Г. Шевченко (акт впровадження від 28.06.2019 р.), що дозволило вирішити ряд задач, пов'язаних з проектуванням систем контролю та управління бронетанковою технікою;

- розроблені методи побудови оптимальних планів багатофакторного експерименту на основі перестановки стовпців матриці планування, табу-пошуку, рою часток і відповідне програмне забезпечення, а також біметалеві датчики температури впроваджено у навчальний процес кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» в курсах лекцій «Теорія планування експерименту» та «Вимірювальні перетворювачі» (акт впровадження від 30.11.2019 р.);

- розроблені волоконно-оптичний датчик вологості і температури та терморегулятори використовуються ПАТ «Авіаконтроль» (акт впровадження від 02.12.2019 р.), що дозволило вирішити ряд задач, пов'язаних з проектуванням систем контролю і моделювання процесів виробництва авіаційної техніки.

Особистий внесок здобувача. У публікаціях, які написані у співавторстві, здобувачу належать такі результати: порівняння вигравів від застосування методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторних експериментів шляхом перестановки стовпців матриці планування при дослідженні технологічних процесів [2]; оптимізація плану проведення багатофакторного експерименту для дослідження вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях [3]; оптимізація плану проведення багатофакторного експерименту режиму техніч-

ного обслуговування комплексу технічних систем [4]; оптимізація плану проведення багатофакторного експерименту для дослідження шорсткості поверхні кремнію під час плазмохімічного травлення елементів МЕМС [5]; запропоновано метод побудови оптимального за вартісними (часовими) витратами плану багатофакторного експерименту, оснований на пошуку алгоритмом рою часток, для виявлення впливу термічних режимів оброблення на механічні властивості оброблюваного матеріалу [6]; застосування методу побудови оптимального за вартісними (часовими) витратами плану багатофакторного експерименту шляхом його пошуку роєм часток, для оптимізації процесу виміру щільності струму гальванічних ванн [7]; розроблення методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту шляхом їх пошуку роєм часток [8]; застосування методів побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту для дослідження ваговимірювальної системи та терморегулятора [9]; розроблення методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку [11]; практична реалізація методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на перестановці стовпців матриці планування [12]; розроблення методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами композиційних планів другого порядку, оснований на використанні табу-пошуку [13]; розроблення методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами трирівневих планів багатофакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку [14]; розроблено метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами композиційних планів другого порядку шляхом їх пошуку роєм часток [15]; програмна реалізація методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами трирівневих планів багатофакторних експериментів шляхом їх пошуку роєм часток [16]; запропоновано використання біметалевого термометра у складі терморегулятора [17]; застосу-

вання додаткового світловоду з волоконним розгалужувачем [18]; застосування нового елемента - біметалевої плоскої пластини [19]; використання біметалевого термометра, який підключено паралельно до світлодіода оптопари [20]; застосування нового елемента - передавального механізму [21]; введення датчика температури до складу ваговимірювальної системи [22]; оптимізація плану проведення багатofакторного експерименту для режимів роботи оператора радіолокаційної системи [24]; використання методу побудови оптимального за вартісними (часовими) витратами плану багатofакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, при дослідженні терморегулятора [25]; розроблення алгоритмів для оптимізації планів експерименту при дослідженні приладу для вимірювання вологості сипучих матеріалів [28]; оптимізація планів дослідження технологічного процесу калібрування переносних дієлькометричних вологомірів [29].

Роботи [1,10, 23, 26, 27, 30] виконані без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Наведені в дисертаційній роботі наукові результати доповідалися і обговорювалися на конференціях, серед яких: «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ – 2014» (Харків, 2014 р.), XII Міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє» (Київ, 2016 р.), XIV Международный научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (UM-2017) » (Болгария, Созополь, 2017 р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017» (Харків, 2017 р.), Одинадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018)» (Київ, 2018 р.), XV Международный научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (UM-2018)» (Болгария, Созополь, 2018 р.), 28th International scientific symposium «Metrology and metrology assurance 2018» (Болгария, Созополь, 2018 р.); Міжнародний науковий

симпозіум «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РІШЕННЯ». Обчислювальний інтелект (Ужгород, 2019 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 30 наукових публікаціях, з них 8 статей - у наукових фахових виданнях України (2 - у виданнях включених до міжнародної наукометричної бази Thomson Reuters Web of Science (WoS), 1 – в іноземному фаховому виданні), 7 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерні програми), 6 патентів на корисну модель, 8 – у матеріалах конференцій (3 – у закордонних, з яких 1 – англійською мовою).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновку, списків використаних джерел по кожному розділу та додатків. Повний обсяг роботи становить 234 сторінок друкованого тексту, з них анотація – на 5 стор., зміст – на 3 стор., основний текст – на 171 стор., список із 30 використаних джерел у вступі – на 4 стор., список із 94 використаних джерел у розділі 1 – на 10 стор., список із 11 використаних джерел у розділі 2 – на 2 стор., список із 21 використаних джерел у розділі 3 – на 3 стор., список із 41 використаних джерел у розділі 4 – на 4 стор., додатки – на 43 стор. Дисертація містить 22 рисунка, та 50 таблиць, з яких 2 на 3 окремих сторінках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У ВСТУПІ

1. Харченко А. А. Устройство для проведения многофакторного эксперимента. *Современные научные исследования и инновации*. Май 2014. Вып. 5. - URL:<http://web.snauka.ru/issues/2014/05/32952>.
2. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма случайного поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вып. 70. С. 255-262.

3. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма табу-поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 52. С. 116-123.
4. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода табу-поиска для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вип. 73. С. 87-93.
5. Кошевой Н.Д., Беляева А.А. Применение метода табу-поиска для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 53. С. 85-91.
6. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода роя частиц для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*: зб. наук. пр. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Вип. 1(81). С. 69-75.
7. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода роя частиц для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2017. Вип. 55. С. 46-51.
8. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма оптимизации ро-ем частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запорожье: ЗНТУ, 2018. Вип. 1 (44). С. 41-49.
9. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследованиии весоизмерительной системы и термо-регулятора. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запорожье: ЗНТУ, 2018. Вип. 4 (47). С.179-187.

10. Комп'ютерна програма «Програма формування каталогів оптимальних планів багатофакторного експерименту» /А. А. Харченко. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 52996. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 09.01.2014.

11. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатофакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 63466. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 06.01.2016.

12. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатофакторного експерименту з використанням алгоритму випадкового пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 63747. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 22.01.2016.

13. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 68266. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

14. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатофакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 68265. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

15. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 71243. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

16. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатofакторного експерименту з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 71242. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

17. Терморегулятор: пат. 121097 Україна: МПК G05D 23/19. №U201705879; заявл. 12.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл.№22.

18. Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури: пат. 122987 Україна: МПК G02B 6/00;G01N 19/10(2006.01); G01K 5/00. № U 201705818; заявл. 12.06.2017; опубл. 12.02.2018, Бюл.№3.

19. Біметалевий датчик температури: пат. 128271 Україна: МПК G01K 7/34; G01R 5/00 (2006.01). №U 201803152; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17.

20. Терморегулятор: пат. 126339 Україна: МПК G05D 23/19 (2006.01). № U 201801516; заявл. 15.02.2018; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

21. Біметалевий датчик температури: пат. 129594 Україна: МПК G01K 7/34 (2006.01). № U 201803081; заявл. 26.03.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

22. Ваговимірювальна система: пат. 129696 Україна: МПК G01F 11/02 (2006.01). № U 201804607; заявл. 26.04.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

23. Харченко А. А. Оптимальные планы многофакторного эксперимента. *Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении: тез.докладов* Харьков: ХАИ, 2014. – С. 41.

24. Кошовий М. Д., Беляєва А. А. Дослідження режимів роботи оператора радіолокаційної системи (РЛС). *Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє»* /за заг. редакцією В.В.Балабіна. – Київ: ВІКНУ, 2016. С. 52.

25. Кошевой Н. Д., Беяева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторного эксперимента. *Тезисы докладов XIV Международного научно-технического семинара «Неопреде-*

ленность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (УМ-2017) ». Болгария, Созополь, 2017. С. 58.

26. Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании терморегулятора. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017»*: збірник матеріалів конференції. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Том 2. С. 106.

27. Беляева А. А. Оптимизация планов экспериментов для исследования процесса термической обработки пористого материала. *Одинадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси (ІРТК-2018)»* : зб. тез. Київ: НАУ, 2018. С.214-216.

28. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Исследование прибора для измерений влажности сипучих материалов. *XV Международный научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (УМ-2018)»* :тез.докладов. Болгария, Созополь, изд. «Софттрейд», 2018. С. 22.

29. Koshevoy N. D., Beliaieva A. A. Rozhnova T.G. Optimal planning methods for measurements in limited material resources conditions. *28th International scientific symposium «Metrology and metrology assurance 2018»*:Proceedings - Technical University of Sofia Publishing house of the Technical University of Sofia, Prepress Softtrade, 130 Issues–September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria. P. 327-330.

30. Беляєва А. А. Оптимізація технологічних процесів виробництва електронних пристроїв. *Міжнародний науковий симпозіум «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РІШЕННЯ»*. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці мжнар. наук.-практ. конф., 15-20 квітня 2019 р., Ужгород : ДВНЗ «Ужгородський національний університет». С. 161-162.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ЗА ВАРТІСНИМИ ТА ЧАСОВИМИ ВИТРАТАМИ

1.1 Методи планування експерименту та аналіз спеціального програмного забезпечення для вирішення проблеми оптимізації планів БФЕ

Планування експерименту дозволяє вирішити задачу отримання математичної моделі при мінімальних вартісних і часових витратах [1]. Отже, необхідно синтезувати план експерименту, який має мінімальну вартість проведення [2]. Методи планування експерименту дозволяють мінімізувати кількість необхідних випробувань, установити раціональний порядок і умови проведення досліджень залежно від їх виду і необхідної точності результатів. Вони враховують випадковий характер розсіювання властивостей випробовуваних об'єктів і характеристик використовуваного обладнання, тому базуються на методах теорії ймовірності та математичної статистики [3].

Планування експерименту містить ряд етапів:

- установлення мети експерименту (визначення характеристик, властивостей і т. п.) і його виду (визначальні, контрольні, порівняльні, дослідницькі);
- уточнення умов проведення експерименту (наявне або доступне обладнання, терміни робіт, фінансові ресурси, чисельність і кадровий склад працівників тощо). Вибір виду випробувань (нормальні, прискорені, скорочені в умовах лабораторії, на стенді, полігонні, натурні або експлуатаційні);
- виявлення і вибір вхідних та вихідних параметрів на основі збору й аналізу попередньої (апріорної) інформації. Вхідні параметри (фактори) можуть бути детермінованими, тобто реєструються, і керованими (залежними від спостерігача), і випадковими, тобто реєструються, але некерованими [4, 5];

- установлення потрібної точності результатів вимірювань (вихідних параметрів), області можливої зміни вхідних параметрів, уточнення видів впливів [6];

- складання плану і проведення експерименту - кількість і порядок випробувань, спосіб збору, зберігання і документування даних [7];

- статистичне оброблення результатів експерименту, побудова математичної моделі поведінки досліджуваних характеристик.

Побудова математичної моделі виконується у випадках, коли повинні бути отримані кількісні характеристики взаємопов'язаних вхідних і вихідних досліджуваних параметрів. Це - завдання апроксимації, тобто вибору математичної залежності, яка найкраще відповідає експериментальним даним. Для цих цілей застосовують регресійні моделі, які засновані на розкладанні шуканої функції в ряд з утриманням одного (лінійна залежність, лінія регресії) або декількох (нелінійні залежності) членів розкладання (ряди Фур'є, Тейлора). Одним із методів для вибору лінії регресії є широко поширений метод найменших квадратів [8].

Також було розроблено Сімоновим К. В. технологію обчислювального експерименту, яка придатна для дослідження природних явищ, особливістю якої є сполучені результати натурних і обчислювальних експериментів [9]. У роботі Лощева А. Г. наводиться стратегія оптимізації, яка базується на плануванні обчислювального експерименту, аналізі ступенів свободи, поєднанні структурної та параметричної оптимізації [10]. Предметною областю роботи є хіміко-технологічні системи. Н. М. Шерихаліна займається розробленням методів фільтрації та ідентифікації результатів обчислювальних експериментів у рамках концепції багатокомпонентного аналізу. Розглядає питання перевірки адекватності результатів обчислювальних експериментів за допомогою порівняння їх з уже відомим приватним точним рішенням або з наближенням, отриманим незалежно іншим чисельним методом. Перевіряється потрапляння

тестового рішення в отриманий інтервал або наявність перетинів інтервалів невизначеностей [11].

Олійник А. Г. представляє результати розроблення інструментальної системи для підтримки обчислювальних експериментів, яка складається з блоків постановки обчислювального експерименту, синтезу бази даних, синтезу програмної реалізації обчислювального експерименту, реалізації обчислювального експерименту і аналізу його результатів і модулів [12].

Проектувальники великих технічних систем повинні максимально захистити їх роботу від так званого людського фактора. Щоб оцінити ефективність упровадженої системи до її реалізації, на етапі проектування потрібно розглянути процес її роботи і взаємодії із зовнішнім середовищем. У таких випадках прийнято описувати систему і її взаємодію з зовнішнім середовищем за допомогою математичних рівнянь [13] і здійснювати математичне моделювання [14 - 16] за допомогою різних методів. Імітаційна модель дозволяє описати реальну систему [17 - 20]. На об'єкт дослідження впливають як керовані, так і некеровані фактори [21]. Для проведення експерименту дослідник повинен мати можливість впливати на поведінку досліджуваного об'єкта або системи [22, 23]. Вираз функції відгуку часто стає невідомим, і дослідник обмежується її поданням у вигляді полінома [24 - 26]. Тому стала актуальною задача розроблення спеціальних програмно-апаратних засобів.

Було здійснено розроблення спеціального програмного забезпечення, такого як СТАТПЛАН, DIPLEX, ПАСЕК, ЕКСПЛАН, ПЛАНЕКС [2,28]. СТАТПЛАН здійснює планування експерименту на гіперкубі і гіперсимплексі. Програма дозволяє виконувати ранжування факторів, працювати з D-, A-, E- оптимальними планами, будувати моделі першого і другого порядків, оцінювати їх і оптимізувати за методом крутого сходження. DIPLEX - діалогова система «ЕОМ - експериментатор», яка дозволяє визначати: вид плану, оптимальні умови досвіду, спосіб аналізу, а також оптимізацію поверхні відгуку. ПАСЕК здійснює оптимальне планування порівняльного експерименту. ПАСЕК - діало-

гова система, яка складається з модулів: завдання, модель, план, аналіз (параметричний і непараметричний). Комп'ютерна система PLAN дозволяє здійснювати вибір оптимального плану, будувати й оцінювати регресійні моделі 2-го і 3-го порядків на кубі, а також оцінювати змішані моделі. Система ЕКСПЛАН складається з модулів: постановки задачі оптимізації, планування експерименту, оцінювання параметрів моделі, перевірки статистичних гіпотез, багатофакторної оптимізації. Основне призначення системи - навчання основам планування експериментів і оброблення їх результатів. Гібридна система ПЛАНЕКС, містить експертну систему, банк теорем, генератор планів, блок ігрових імітацій, статистичний пакет для обробки даних і надає можливості щодо прийняття рішень на неформалізованих етапах (вибір моделі) [2,28].

Також набула поширення програма Statistical Package of the Social Science (SPSS). Statistical Package of the Social Science (SPSS) - статистичний пакет, що використовується для соціальних наук і вважається однією з найпоширеніших програм, яка дозволяє обробляти статистичні дані. Вона реалізує такі функції: планування, збір даних, управління і доступ до даних, а також аналіз і формування звітів. Ця програма також дозволяє побудувати регресії, перевірити тип розподілу випадкових величин, перевірити наявність параметра «Missing values» (пропущені значення), використовуючи параметричні критерії, такі як Стюдента, Фішера, Пірсона, і непараметричні критерії, такі, як критерії Колмогорова - Смирнова, Манна - Уїтні, для того щоб обробити вхідні значення, а також функції генерації випадкових чисел [29, 30].

Програма STATISTICA також набула поширення під час оброблення різноманітних статистичних даних. До основних функцій модуля STATISTICA Base належать формування описової і внутрішньогрупової статистики, кореляція, інтерактивний калькулятор, а також критерії групових відмінностей, таблиці частот, аналіз багатовимірних відгуків, створення множинної регресії, відображення непараметричної статистики, дисперсійного аналізу. Також наведені моделі найменших квадратів, різноманітні способи угруповання даних,

застосовані методи загального як одновимірного, так і багатовимірного дисперсійного аналізу, що дає нам можливість обробляти плани практично необмеженої складності [29, 31]

STADIA - універсальний програмний продукт, що призначений для аналізу даних. Він був створений в МДУ ім. М. В. Ломоносова (головний конструктор - А. П. Кулаїчев) разом з НПО "Інформатика і комп'ютери". Головною відмінною рисою цього програмного продукту є наявність спеціальних інструментів, що використовуються під час проведення різних досліджень [31, 32].

STATGRAPHICS і її модулі: Центуріон (програмний додаток), Сігмаекспрес (Excel надбудова), Statgraphics онлайн, Statgraphics Web Services, STATBEANS (статистична бібліотека) [29, 33]. S-plus - система для статистичного аналізу даних, що відрізняється такими властивостями як потужність і розширюваність, а також містить дендрологічне моделювання, нечіткий кластерний аналіз і ряд інших додаткових можливостей, дозволяє підключати додаткові модулі в уже скомпільованому вигляді. Має графічний інтерфейс, надає великі можливості для візуалізації даних.

24 STATA - професійний статистичний програмний пакет. Один з найпопулярніших в освітніх і наукових установах США поряд з SPSS. STATA є інтерпретатор мови програмування статистичних завдань, має інтерфейс командного рядка з можливістю доповнення графічним інтерфейсом. SAS / IDS - система статистичної обробки даних, об'єднує понад 20-ти різних програмних модулів. Основним способом роботи з системою є командний рядок, а також для неї існують і графічні оболонки. SYSTAT - повномасштабна статистична система для дослідників [29, 34].

ОЛІМП: Стат-Експерт призначена для аналізу і прогнозування даних різної природи на основі математичних методів. Відмінними рисами програми є реалізація авторських алгоритмів: метод "ОЛІМП" - аналог методу Бокса - Дженкінса, що потребує стаціонарності вихідних даних; блок побудови уза-

гальненого прогнозу на основі декількох адекватних моделей; інтегрований критерій якості моделі; механізм відновлення пропущених спостережень на основі інтерполяційних формул, трендових і регресійних моделей [29, 34]. EВРІСТА- спеціалізований статистичний пакет з дослідження часових рядів. До основних функцій пакета належать: вивчення законів розподілу випадкових величин, прогнозування, регресійні моделі, факторний аналіз, моделювання даних [29, 34].

Деякі статистичні функції реалізовані у програмних засобах, таких як Matlab, MS Excel, Mathcad. Для користувачів-початківців розроблено такі програми: NCSS, BMDP, MINITAB 14 [36]. PRISM розроблена спеціально для біомедичних цілей, EQS використовується для аналізу даних, отриманих під час проведення психологічних досліджень. Для більш детального вивчення виробничих процесів можуть використовуватися такі програми: Arena (фірма Rockwell Automation) [37], AnyLogic (компанія XJ Technologies), AutoMod (фірма Brooks Automation), SIMUL8 (компанія Corporate Headquarters), Promodel, Witness, QUEST, eM-Plant, MTSS (Manufacturing and Transportation Simulation System), Vissim, Deneb / Quest, AGNES, ISSOP, AweSim, Flexsim, Aimsun [38, 39].

Відомим середовищем імітаційного моделювання є GPSS (General Purpose Simulating System) [34, 40]. Однією зі складових сучасних пакетів для імітаційного моделювання є генератори випадкових чисел (ГВЧ). Як показує огляд джерел [29, 37, 41], можна виділити кілька видів ГВЧ. За способом отримання чисел виділяють фізичні, табличні, алгоритмічні генератори [29, 38, 41]. Табличні ГВЧ як джерело випадкових чисел використовують спеціальним чином складені таблиці, що містять перевірені некорельовані дані. Апаратні ГВЧ (фізичні) являють собою пристрої, що перетворюють у цифрову форму будь-який параметр навколишнього середовища або фізичного процесу [29, 38, 41]. Мета проведення експерименту визначає вибір методу оптимізації. Неправильний вибір методу може призвести до подорожчання і ускладнення експеримен-

ту, отримання недостатньої чи надлишкової інформації, а інколи - і до хибних результатів [42, 43].

Програмні комплекси, наведені в розділі 1.1, не дозволяють вирішити задачу оптимізації планів експериментів за вартісними і часовими витратами. Зокрема, вони не враховують вартість переходів рівнів кожного фактора, а також в них немає можливості виконувати оптимізацію трирівневих планів експериментів і композиційних планів другого порядку. Тому для вирішення цієї задачі є актуальним розроблення спеціальних методів і програмного забезпечення. Аналіз уже відомих методів наведено в розділі 1.2.

1.2 Аналіз методів, що застосовуються для оптимізації за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту

1.2.1 Метод повного перебору

Для планування обсягу експерименту знайшли застосування спеціальні прийоми, що використовують математичну статистику. Дуже цікаві приклади різних підходів у вирішенні завдання планування необхідного об'єму проведення самого експерименту наведено в [44].

Метод повного факторного експерименту також представлений в [45 - 48].

Співробітники Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості розробили метод повного перебору та відповідне програмне забезпечення [49] для синтезу оптимального за вартісними (часовими) витратами плану проведення експерименту. Із застосуванням розробленого методу організовано і проведено дослідження ваговимірювальної системи [50].

Як критерії оптимізації були обрані технічні показники ваговимірювальної системи - похибка вимірювання δ , %; чутливість (коефіцієнт передачі) S . Факторами, які впливають на ці показники - X_1 - кут нахилу ваговимірюваль-

ного лотка α , град; X_2 - вологість сипучого матеріалу W , %; X_3 - коефіцієнт тертя сипучого матеріалу в русі f_d .

Для виявлення закономірностей дозування і знаходження оптимальних режимів і конструктивних параметрів ваговимірювальної системи був обраний початковий план ПФЕ типу 2^k (кількість факторів $k = 3$, кількість дослідів $N = 8$). Матриця планування такого експерименту, вартості змін і початкової установки значень рівнів факторів, а також оптимальний план експерименту наведені в [50].

Вартості реалізації експериментів за початковим і оптимальним планами, а також максимальна вартість реалізації наведено в таблиці 1.1 [50].

Таблиця 1.1 - Вартості реалізації планів експерименту

Вид плану	Вартість реалізації, ум. од.
Початковий	164
Оптимальний	102
Максимальна вартість реалізації плану	278

Основними перевагами методу повного перебору є: методична простота рішення, можливість точного розв'язання завдання.

Недоліки методу: неможливість точного рішення у разі, якщо кількість факторів $k > 3$, і існують великі витрати часу для отримання результату.

1.2.2 Метод випадкового пошуку

При вирішенні складних комбінаторних задач постає питання швидкодії алгоритмів. Так, для NP-важких задач точні алгоритми гарантовано знаходять оптимальне рішення задачі, але мають низьку швидкодію, тому при вирішенні таких завдань часто доводиться користуватися наближеними алгоритмами, що дозволяють в більшості випадків знаходити близькі до оптимальних рішення. Основною складністю при застосуванні евристичних алгоритмів є проблема виходу з локальних оптимумів. Тому були винайдені метаевристичні алгорит-

ми [51, 52], такі, як випадковий пошук, що направляють роботу проблемно-орієнтованих евристик до кращих областей простору пошуку [53 - 55].

Головною ідеєю методу випадкового пошуку є перебір випадкових сукупностей факторів експерименту, для того щоб знайти оптимум цільової функції або напрямку руху до неї. Наукові співробітники кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» розробили метод випадкового пошуку (перестановки рядків матриці планування) [50] і відповідне програмне забезпечення [56, 57]. Був також розроблений пристрій, що застосовується для виміру товщини діелектричного покриття на поверхні металевого виробу, в основу якого покладено використання вихорострумів перетворювачів [58].

Для його дослідження проведений синтез оптимальних за вартісними витратами планів експерименту, що дають змогу врахувати вартість зміни рівнів факторів. Як критерії оптимізації були відібрані такі показники: δ - похибка вимірювання, %; $H_{\max}$ - максимальна межа вимірювання; P - середня споживана потужність, мВт; S -чутливість, мВ/мм; m - маса, г. Домінуючими чинниками, що впливають на дані показники, вибрані: X_1 - діаметр сердечника, мм; X_2 - висота сердечника, мм; X_3 - кількість витків; X_4 - частота напруги живлення, Гц.

Початковий план ПФЕ, вартості змін значень рівнів факторів від «-1» до «+1» і від «+1» до «-1»; від «0» до «+1» і від «0» до «-1» дано в [50]. Оптимізацію початкового плану ПФЕ проводили за критерієм сумарної вартості реалізації експерименту.

За допомогою пакета прикладних програм [56, 57] синтезований оптимальний за вартістю проведення план експерименту, отриманий в результаті реалізації випадкового пошуку (проаналізовано 593 445 варіантів). Вартість реалізації експерименту за планом, отриманим методом випадкового пошуку, дорівнює 101,8 ум. од. (4148-й варіант плану), тоді як максимальна вартість - 246,0 ум. од. (587850-й варіант плану). Таким чином, виграш у вартості ре-

алізації експерименту з дослідження перетворювача становить 2,01 раза порівняно з початковим планом і 2,42 раза в порівняно з планом експерименту максимальної вартості.

Метод випадкового пошуку має дві суттєві переваги: він може бути використаним для будь-якої вихідної функції незалежно від того, чи є вона унімодальною чи ні; ймовірність знайдення точного результату не має прямої залежності від розмірності задачі, що вирішується. У ньому застосовується функція Random, що являє собою випадкове число, обране з інтервалу $[0, 1]$.

Головним недоліком методу випадкового пошуку є той факт, що наперед невідомо, яку кількість випадкових напрямків треба розглянути для отримання кожної нової точки з траєкторії пошуку. Це призводить до значних витрат на проведення однієї ітерації. Оскільки під час вибору напрямку пошуку не застосовується інформація про характер цільової функції, кількість ітерацій в алгоритмі може бути дуже великою. Тому доцільно використовувати метод випадкового пошуку в процесі проведення досліджень об'єктів, що наразі належать до класу маловивчених, а також для того, щоб вийти із зони локального екстремуму вихідної функції під час пошуку глобального рішення.

1.2.3 Метод гілок і меж

Метод гілок і меж, а також інші методи оптимізації параметрів запропоновано в [59 - 63]. Задачі дискретної оптимізації мають безліч допустимих рішень, які теоретично можна перебрати і вибрати найкраще (що дає мінімум або максимум цільової функції). Практично ж часто це буває неможливо здійснити навіть для задач невеликої розмірності. У методах неявного перебору робиться спроба так організувати перебір, використовуючи властивості розглянутої задачі, щоб обрати частину допустимих рішень. Найбільшого поширення серед схем неявного перебору отримав метод гілок і меж, в основі якого лежить ідея послідовного розбиття множини допустимих рішень [59]. На кожному

кроці методу елементи розбиття (підмножини) піддаються аналізу - чи містить ця підмножина оптимальне рішення чи ні. Якщо розглядається задача на мінімум, то перевірка здійснюється шляхом порівняння нижньої оцінки значення цільової функції у даній підмножині з верхньою оцінкою функціоналу. Як оцінка зверху використовується значення цільової функції на деякому допустимому інтервалі. Допустиме рішення, що дає найменшу верхню оцінку, називають рекордом. Якщо оцінка знизу цільової функції у даній підмножині не менше оцінки зверху, то розглядувана підмножина не містить рішення кращого за рекорд і може бути відкинута. Будемо говорити, що підмножина рішень переглянута, якщо встановлено, що вона не містить рішення кращого за рекорд. В іншому випадку серед проглянутих елементів розбиття вибирається підмножина, що є в певному сенсі перспективною. Вона піддається розбиттю (розгалуженню). Нові підмножини аналізуються за описаною вище схемою. Процес триває доти, доки не будуть переглянуті всі елементи розбиття [60, 62].

Співробітники кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості у Національному аерокосмічному університеті ім. М. С. Жуковського «ХАІ» проводили оптимізацію багатофакторних планів експерименту із застосуванням методу гілок і меж та розробили відповідне програмне забезпечення [50, 61].

Перевірку працездатності розробленого методу гілок і меж було проведено на практичних завданнях, які раніше були вирішені за допомогою методів аналізу перестановок і випадкового пошуку. Під час проведення дослідження переносних дієлькометричних вологомірів за допомогою методу гілок і меж було отриманий план експерименту, що має таку ж саму вартість, як і оптимальний план, який було отримано за допомогою методу аналізу перестановок рядків матриці планування експеримента. За оптимальним планом вартість проведення експерименту становить 70 ум. од. Вартість реалізації експериментів за оптимальними планами для дослідження технологічного процесу

вимірювання площі металізації друкованих плат дорівнює 3,99 ум. од., а час проведення експерименту - 25,3 хв.

Головний недолік методу гілок і меж полягає в необхідності повністю вирішувати завдання лінійного програмування, асоційовані з кожною з вершин багатогранника допустимих рішень. Для задач великої розмірності це потребує значних і, до певної міри, невиправданих з практичної точки зору витрат часу.

1.2.4 Метод найближчого сусіда

Метод найближчого сусіда і його застосування для оптимізації розглянуто в [64 - 66].

Було виконано дослідження і оптимізацію різних технологічних процесів з використанням методу найближчого сусіда і відповідного програмного забезпечення [67].

Результати оптимізації багатofакторних експериментів розробленим методом, а також порівняння його з застосованими раніше методами аналізу перестановок і випадкового пошуку наведено в таблиці 1.2 [50].

Таблиця 1.2 - Порівняння результатів оптимізації планів експериментів різними методами

Об'єкт дослідження	Початковий план	Максимальна вартість	Метод найближчого сусіда
Дослідження гальванічного міднення друкованих плат (n=4)	142,12	296,08	43,66
Обслуговування комплексу технічних систем (n = 5)	1728,10	2068,38	552,43
Дослідження вихорострумів вимірювачів товщини покриттів (n = 4)	204,50	255,30	62,15

Доведено працездатність і ефективність методу найближчого сусіда при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем. При кількості факторів $k > 3$ досягнуто кращих результатів порівняно з іншими методами, а при $k = 2$ результати збігаються з методом повної перестановки рядків матриці планування. Пошук оптимального або близького до оптимального плану реалізується за суттєво менший час, якщо використовувати метод найближчого сусіда [50].

Переваги методу найближчого сусіда: стійкість до аномальних викидів, тому що ймовірність попадання такого запису до числа n -найближчих сусідів мала; програмна реалізація алгоритму відносно проста; результат роботи алгоритму легко піддається інтерпретації; можливість модифікації алгоритму шляхом використання найбільш придатних функцій поєднання і метрик дозволяє підлаштувати алгоритм під конкретну задачу.

Метод наблизького сусіда має і ряд недоліків. По-перше, набір даних, який використовується для алгоритму, повинен бути репрезентативним. По-друге, модель не можна "відокремити" від даних: для класифікації нового об'єкта вибірки потрібно використовувати всі приклади. Ця особливість сильно обмежує використання алгоритму.

1.2.5 Жадібний алгоритм

Жадібний алгоритм є широко відомим методом комбінаторної оптимізації [68 - 70].

З використанням жадібного алгоритму (greedy algorithm) можливо вирішити безліч задач. Цей вид алгоритму виконує локально оптимальний вибір на кожному кроці, надіючись на те, що підсумковий результат буде оптимальним, але це не завжди так. Однак для великої кількості задач цей алгоритм насправді дає оптимум. Можливим є застосування принципу жадібного вибору до оптимізаційної задачі, у разі якщо послідовність жадібних (локально оптимальних) виборів у результаті приводить до глобального оптимального

розв'язання задачі. Різниця поміж динамічним програмуванням і жадібним алгоритмом полягає у такому: жадібний алгоритм вибирає "найжирніший шматочок" на кожному кроці, а вже потім робить спробу зробити кращий вибір серед варіантів, що залишилися, якими б вони не виявилися; натомість алгоритми динамічного програмування роблять свій вибір, заздалегідь розрахувавши наслідки від використання всіх доступних варіантів.

Розроблено метод оптимізації планів експерименту за вартісними або часовими витратами з використанням жадібного алгоритму та відповідне програмне забезпечення [71].

При пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту ($k = 4$) методом, оснований на застосуванні жадібного алгоритму, було отримано план експерименту, який має меншу вартість, ніж оптимальний план, отриманий методом перестановки рядків матриці планування при аналізі 65576 варіантів [50]. Вартість реалізації експерименту за оптимальним планом становить 86,62 ум. од. При реалізації плану експерименту, отриманого за допомогою жадібного алгоритму, - 32,26 ум. од. при вартості змін значень рівнів факторів, наведених в [50]. Час рахунку методом перебору становив 17,85 с, а жадібним алгоритмом - 0,04 с.

Головними перевагами жадібного алгоритму є: висока швидкість, можливість працювати з великими значеннями кількості факторів k , простота реалізації. Основний недолік полягає в неможливості отримання точного рішення.

1.2.6 Метод імітації відпалу

Алгоритм імітації відпалу [72] являє собою вірогідну процедуру локального пошуку і належить до широко відомого класу метаевристичних алгоритмів [73, 74]. Алгоритм імітації відпалу робить кроки які як поліпшують, так і погіршують цільову функцію, що дозволяє переходити від локальних оптимумів до інших рішень.

Розроблено метод і програмне забезпечення оптимізації планів експерименту за вартісними або часовими витратами з використанням імітації відпалу [75].

Перевірка працездатності розробленого методу та програмного забезпечення для оптимізації багатофакторних планів експерименту здійснювалась на ряді практичних завдань, вирішених методами перестановок, випадкового пошуку і жадібного алгоритму. Порівняння цих результатів наведено в таблиці 1.3 [50].

Таблиця 1.3 - Порівняння результатів оптимізації планів експериментів різними методами на ряді практичних задач

Об'єкт дослідження	Виграш у вартісних або часових витратах					
	Метод перестановки	Початковий план	Жадібний алгоритм	План максимальної вартості	Випадковий пошук	Імітації відпалу
Ваговимірювальна система ($n = 3$)	102	164	108	278	-	102
Оптимальні комбінаторні плани багатофакторного експерименту ($n = 4$)	86,62	130,48	32,26	243	-	37,2
Дослідження вихорострумових вимірювачів товщини покриттів ($n = 4$)	112,85	204,5	50,5	255,3	101,8	61,55
Дослідження пристрою для контролю якості діелектричних матеріалів (по енергоспоживанню) ($n = 4$)	24,9	30	20,8	89,8	30	24,3

При пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту ($k = 4$) методом, оснований на застосуванні імітації відпалу, було витрачено 0,422 с.

Отримані результати можна порівняти з раніше розробленими методами (жадібний алгоритм - 0,24 с, метод перестановки - 17 с).

Але слід не забувати, що при збільшенні кількості факторів швидкодія буде зменшуватися.

Також при використанні алгоритму імітації відпалу ступінь сканування прямо пропорційно впливає на швидкодію програмного забезпечення. Тобто, при збільшенні ступеня сканування на одиницю швидкодія зменшиться в два рази. Доведено працездатність і ефективність методу при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем.

Пошук оптимального або близького до оптимального плану, отриманого цим методом, реалізується за суттєво менший час рахунку, ніж при методі повного перебору рядків матриці планування. Застосування алгоритму імітації відпалу дає результати, близькі до результатів, отриманих жадібним алгоритмом, а в деяких випадках дає кращі результати. Завдяки своїй простоті, гнучкості й ефективності алгоритм імітації відпалу широко застосовується на практиці.

Крім того він має асимптотичну збіжність. Це означає, що з ростом кількості ітерацій імовірність опинитися в точці глобального оптимуму прагне до одиниці, але на практиці немає можливості виконати нескінченне число ітерацій.

1.2.7 Мурашині алгоритми

Мурашиний алгоритм є алгоритмом класу «ройовий інтелект». Поняття «ройового інтелекту» (Swarm intelligence) уведено Херардо Бені і Ван Цзи-ном у 1989 році. Під «ройовим інтелектом» розуміють систему, що самоорганізується і складається з безлічі агентів. Агенти підкоряються простим правилам поведінки в навколишньому середовищі. Їх проста взаємодія визначає колективну адаптацію. Незважаючи на примітивність поведінки агентів в цілому, вони утворюють ройовий інтелект. Прикладами таких систем можуть бути мураши-

на колонія, бджолиний рій, зграя птахів, риб і т.д. Розроблення модифікацій мурашиних алгоритмів є необхідним етапом вирішення прикладних завдань з різних областей науки [76].

В алгоритмі мурашиної системи [77—79] задача оптимізації планів експериментів вирішується шляхом ітераційного моделювання руху мурах між початковою і кінцевою вершинами графа [80]. Кожна мураха будує рішення, переміщуючись між вузлами графа, з єдиним обмеженням: усі вершини вона повинна відвідати по одному разу [81].

На кожному кроці конструювання рішення мураха вибирає наступний вузол відповідно до стохастичного механізму, на який впливають довжина дуги і кількість феромону. Феромон - властивість дуги, яка може бути змінена мурахою за певним законом. Ця властивість використовується для створення позитивного зворотного зв'язку в алгоритмі. В кінці кожної ітерації мурахи модифікують значення кількості феромону на дугах, який впливає на мурах в наступних ітераціях алгоритму.

При пошуку їжі мураха прокладає шлях своїми феромонами, і як наслідок - з'являються численні поїздки між колонією і їжею. При проходженні по одному і тому ж маршруту встановлюється новий феромон, старі шляхи будуть забуватися, оскільки феромон розпадається в навколишньому середовищі. Інші мурахи будуть слідувати по найкращому шляху і також залишати феромони.

Моделюючи подібний процес на графі, ребра якого будуть різними маршрутами на шляху до мети для проходження мурах, отримаємо найбільш концентрований шлях [82, 83]. Саме він стане рішенням для завдання, отриманим методом мурашиних колоній.

У таблиці 1.4 [50] наведено результати дослідження - середній і кращий результати, отримані методом мурашиної системи при оптимальних параметрах алгоритму. Також проводилося порівняння цих результатів з результатами, отриманими методом гілок і меж (МГМ) і методом послідовного наближення (МПН).

Таблиця 1.4 - Результати дослідження

Номер прикладу	Кількість факторів	Середній результат оптимізації, ум. од.	Найкращий результат, ум. од.	МГМ, ум. од.	МПН, ум. од.
1	3	22,6	22	22	22
2	3	118,6	109	109	137
3	3	53	53	53	53
4	4	55,5	54	52	54
5	4	372,1	367	205	221
6	4	161,6	161	161	181
7	5	599,7	581	425	437
8	5	278,1	270	274	281

Таким чином, метод мурашиної системи дозволяє отримати кращі результати порівняно з методом гілок і меж та методом послідовного наближення для кількості факторів $k \geq 5$. Основною перевагою методу є не схильність до неоптимальних початкових рішень (через випадковий вибір шляху і пам'яті колонії), а також те, що мурахи спираються на пам'ять про всю колонію замість пам'яті тільки про попереднє покоління. Ці рішення можуть використовуватися в динамічних додатках.

Головними недоліками алгоритму є: у результаті послідовності випадкових рішень розподіл імовірностей змінюється при ітераціях; дослідження більше експериментальне, ніж теоретичне; збіжність гарантується, але час збіжності не визначений; зазвичай необхідно застосувати додаткові методи, такі, як локальний пошук; сильно залежать від настроювальних параметрів, які підбираються тільки виходячи з експериментів.

1.2.8 Генетичні алгоритми

У живій природі було запозичено ідею створення генетичних алгоритмів. Ця ідея у своїй основі має організацію еволюційного процесу таким чином, щоб в кінці отримати оптимальне рішення складної комбінаторної задачі.

На сучасному рівні розвитку науки генетичні алгоритми є конкурентоспроможними під час вирішення NP-важких задач, а особливо таких, в яких математична модель має складну структуру і, як наслідок, використання звичайних методів таких як: метод гілок і меж, метод лінійного програмування чи динамічного дуже ускладнено.

З використанням генетичних алгоритмів (ГА) легко виконати класифікацію, прогнозування, пошук оптимального варіанта експерименту. ГА не можливо замінити в тих випадках, коли у типових умовах вирішення завдання ґрунтується на інтуїції або досвіді експериментатора, а не на строгому математичному описі.

Генетичні алгоритми являють собою прості моделі еволюцій у природі, що реалізуються у вигляді комп'ютерних програм. У них застосовуються аналоги механізму генетичного успадкування і природного відбору, зберігаючи при цьому біологічну термінологію в більш простому вигляді. Це - ніби штучний світ, що має безліч істот (осіб), а кожна з істот являє собою деяке рішення оптимізаційної задачі.

Вважатимемо, що чим більше особина пристосована, тим краще відповідно знайдене рішення. У цьому разі завдання мінімальної цільової функції зводиться до знайдення найменш пристосованої особи. Але ми не зможемо поселити у нашому віртуальному світі всі особи одночасно через їх велику кількість. Натомість розглянемо велику кількість поколінь, які змінюють одне одного.

Отриманий світ буде підпорядковуватися усім законам еволюції, якщо ми зможемо привести в дію генетичне спадкування та природний відбір. Відповідно до нашого визначення пристосованості кінцевою метою штучної еволюції стане формування найкращих рішень. Без сумніву еволюція являє

собою нескінченний процес, у результаті якого пристосованість істот поступово збільшується.

У разі примусового зупинення цього процесу через достатньо довгий час після його розпочинання і вибору найбільш пристосованої істоти у поколінні ми маємо змогу отримати не абсолютно точний, але близький до оптимального варіант вирішення. Генетичні алгоритми знайшли застосування при вирішенні різних видів завдань [85 - 87].

Для підвищення ефективності досліджень технологічних процесів велике значення має отримання адекватної математичної моделі процесу за результатами багатофакторних експериментів при мінімальних вартісних і часових витратах. Для пошуку планів експерименту було обрано класичний генетичний алгоритм (КГА) [88].

Вартості змін рівнів факторів дано в [88]. Побудова плану експерименту відбувалася за допомогою розробленого програмного забезпечення [89, 90] у середовищі Java, що детально описано в [91].

Вихідний план експерименту був оптимізований такими методами: аналіз перестановок рядків матриці планування (АП), випадковий пошук (ВП), класичний ГА (КГА).

Порівняльний аналіз методів оптимізації за основними показниками на прикладах розглянутих технологічних процесів наведено в таблиці 1.5 [88].

Найкращими показниками за вартістю реалізації та швидкодії при оптимізації технологічних процесів мають плани, оптимізовані з використанням генетичних алгоритмів. Найгірші показники за часовими і вартісними витратами виходять при оптимізації методом випадкового пошуку. КГА дозволяє отримати більший виграш за вартістю реалізації експерименту з меншими часовими витратами порівняно з методами аналізу перестановок рядків матриці планування і випадкового пошуку.

Таблиця 1.5 - Порівняльний аналіз показників оптимізації

Технологічний процес	Метод	Вартість реалізації вихідної матриці планування, ум.од.	Оптимізована вартість, ум.од.	Виграш за вартістю реалізації, раз	Час рахунку, сек
Вимірювання щільності струму гальванічних ванн	Аналіз перестановок	174	147	1,18	697
	Випадковий пошук		110	1,58	737
	Класичний ГА		64	2,72	3,64
Гальванічне міднення друкованих плат	Аналіз перестановок	72,19	30,46	2,37	527
	Випадковий пошук		41,8	1,73	491
	Класичний ГА		25,83	2,79	2,42
Контроль якості діелектричних матеріалів	Аналіз перестановок	24,7	19,1	1,29	494
	Випадковий пошук		23,4	1,06	501
	Класичний ГА		16,1	1,53	1,44

Основні переваги генетичних алгоритмів: висока швидкість, можливість працювати з великим значенням кількості факторів k , незалежність від виду вихідних даних. Головний недолік алгоритму полягає в тому, що він не гарантує отримання точного рішення.

1.3 Порівняльний аналіз методів, що застосовуються для мінімізації вартості проведення багатфакторного експерименту

Можливе застосування методів комбінаторної оптимізації [92 - 94]. Кожен з методів, розглянутих у розділі 1.2, має свої переваги і недоліки. Наприклад, метод повного перебору дозволяє отримати точний результат, проте він має низьку швидкодію і для великої кількості факторів ($k > 4$) його застосування не можливе. А якщо застосовувати інші алгоритми, то можна отримати тільки наближений до оптимального план експерименту. Крім того, вони мають обмеження на кількість факторів k і різні показники швидкодії. В алгоритмі імітації

відпалу є істотний недолік - при одних і тих же даних результати оптимізації можуть бути різними. Це пов'язано з тим, що в алгоритмі використовується випадкова генерація двох чисел X , Y . Вони можуть відрізнятися від чисел, згенерованих за початковою роботою алгоритму, що безпосередньо вплине на результат оптимізації.

Перевагами жадібного алгоритму є його простота, висока швидкодія, мінімальне використання оперативної пам'яті, мінімальна кількість перетинів. Недоліки жадібного алгоритму: відсутність налаштувань не дає можливості, в разі необхідності, погіршити якість результатів обчислень за рахунок зменшення часу обчислень; відсутність перевірки на перетини; приріст часу рахунку носить експонентний характер.

Основною перевагою методу гілок і меж є те, що в будь-який момент, припинивши обчислення, краще рішення, що відповідає мінімальній вартості проведення експерименту, може бути прийнято за наближене рішення задачі. Основним недоліком методу гілок і меж є необхідність визначення вартості в кожній вершині дерева розгалуження, а при великій кількості факторів, кількість вершин стає значною, що не дозволяє провести розгляд усіх вершин дерева розгалужень.

Недоліком генетичних алгоритмів є те, що при аналізі простих цільових функцій (мають лише один екстремум) цей метод завжди програє за швидкістю простим алгоритмам пошуку. Генетичні алгоритми також не гарантують знайдення глобального рішення за прийнятний час і того, що віднайдене рішення буде оптимальним. Однак вони можуть застосовуватися для пошуку «досить хорошого» вирішення завдання оптимізації планів багатфакторного експерименту за «досить малий проміжок часу». Генетичні алгоритми є різновидом алгоритмів пошуку і мають значні переваги перед іншими алгоритмами при великій кількості факторів, а також вони стійкі щодо потрапляння у локальний оптимум. Якщо задача оптимізації може вирішитися спеціально створеним для неї методом, то практично завжди такий метод буде більш ефектив-

ним ніж генетичні алгоритми як за точністю знайденого рішення, так і за швидкістю.

Головною перевагою алгоритму найближчого сусіда є простота його реалізації. Недоліками алгоритму найближчого сусіда є неефективна витрата пам'яті і надмірне ускладнення вирішального правила внаслідок необхідності зберігання навчальної вибірки в цілому, а також те, що пошук найближчого сусіда передбачає порівняння об'єкта, що класифікується, з усіма об'єктами вибірки, що потребує лінійної по довжині вибірки кількості операцій.

Перевагами мурашиних алгоритмів є те, що вони: спираються на пам'ять про всю колонію замість пам'яті тільки про попереднє покоління; менш схильні до неоптимальних початкових рішень (через випадковий вибір шляху в пам'яті колонії); працюють краще, ніж генетичні алгоритми. Недоліками мурашиних алгоритмів є: недостатній теоретичний аналіз (у результаті послідовності випадкових рішень, розподіл ймовірностей змінюється при ітераціях; дослідження більше експериментальне, ніж теоретичне); збіжність гарантується, але час збіжності не визначений; зазвичай необхідне застосування додаткових методів, таких, як локальний пошук; дуже залежать від параметрів що налаштовуються, які підбираються виходячи з експериментів.

Переваги і недоліки методів, розглянутих в розділі 1.2, відображені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Переваги і недоліки методів оптимізації

№ п/п	Метод оптимізації	Переваги	Недоліки
1	Метод повного перебору	Дозволяє отримати точний результат	Має низьку швидкість і для великої кількості факторів ($k > 4$) його застосування неможливе
2	Метод випадкового пошуку	Має високу швидкість і дозволяє отримати оптимальне рішення за невеликий проміжок часу	При великому числі факторів має низьку швидкість; не дозволяє отримати точне рішення

Продовження таблиці 1.6

№ п/п	Метод оптимізації	Переваги	Недоліки
3	Метод гілок і меж	У будь-який момент часу, припинивши обчислення, краще рішення, що відповідає мінімальній вартості проведення експерименту, може бути прийнято за наближене рішення задачі	Необхідність визначення вартості в кожній вершині дерева розгалуження, а при великій кількості факторів число вершин стає значним, що не дозволяє провести розгляд усіх вершин дерева розгалужень.
4	Метод найближчого сусіда	Простота його реалізації і висока швидкодія	Неефективна витрата пам'яті і надмірне ускладнення вирішального правила внаслідок необхідності зберігання навчальної вибірки в цілому
5	Жадібний алгоритм	Простота, висока швидкодія, мінімальне використання оперативної пам'яті, мінімальна кількість перетинань	Відсутність налаштувань не дає можливості, в разі необхідності, погіршити якість результатів обчислень за рахунок зменшення часу обчислень; відсутність перевірки на перетини; приріст часу рахунку носить експонентний характер
6	Метод імітації відпалу	Ефективний для кількості факторів $2 < k < 5$ і володіє високою швидкістю	При одних і тих же даних результати оптимізації можуть бути різними. Це пов'язано з тим, що в алгоритмі використовується випадкова генерація двох чисел X , Y . Вони можуть відрізнитися від чисел, згенерованих на початку роботи алгоритму

Продовження таблиці 1.6

7	Мурашині алгоритми	Спираються на пам'ять про всю колонію замість пам'яті тільки про попереднє покоління; менш схильні до неоптимальних початкових рішень (через випадковий вибір шляху в пам'яті колонії)	Недостатній теоретичний аналіз (в результаті послідовності випадкових рішень розподіл імовірностей змінюється при ітераціях); необхідне застосування додаткових методів, таких, як локальний пошук; залежать від настроювальних параметрів, які підбираються виходячи з експериментів
8	Генетичні алгоритми	Можливо застосувати для пошуку «досить хорошого» рішення задачі оптимізації планів багатфакторного експерименту за «досить короткий час». Стійкі до потрапляння в локальні оптимуми	У простих цільових функціях (мають один екстремум) ці алгоритми завжди програють за швидкістю простим алгоритмам пошуку. Генетичні алгоритми не гарантують виявлення глобального рішення за прийнятний час

Резюме до розділу 1

У першому розділі було сформульовано задачу оптимізації планів багатфакторного експерименту, а також наведено різноманітні методи оптимізації, що можуть застосовуватися для вирішення цієї задачі, а саме методи: повного перебору, випадкового пошуку, гілок і меж, найближчого сусіда, імітації відпалу, жадібного алгоритму, мурашиних алгоритмів, генетичних алгоритмів. Були оцінені переваги і недоліки кожного методу, а також було проведено їх порівняльний аналіз. Для вибору найбільш підходящого методу треба керуватися як розмірністю задачі, так і характером цільової функції.

Для досягнення мети дослідження в дисертаційній роботі поставлені такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи оптимізації планів багатofакторних експериментів;
- розробити методи та програми для оптимізації планів багатofакторного експерименту з використанням їх пошуку шляхом перестановки стовпців матриці планування, табу-пошуком, роєм часток, а також провести експериментальні дослідження цих методів;
- провести порівняльний аналіз розроблених та існуючих методів оптимізації багатofакторних планів експериментів;
- удосконалити систему для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу;
- впровадити результати досліджень у практику промислових підприємств та організацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 1

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 28 с.
2. Adler Y. P., Granovsky, Y. V. Optimal Design of Experiments, Theory and Application. *The Age of Maturity: Fifty Years of Methodology and Applications of Experimental Design in Russia* : Proceedings of the International Conference in Honor of the late Jagdish Srivastava Satellite Conference of the 58th ISI World Statistics Congress (Vienna, Austria, September 25th-30th, 2011). Vienna, Austria, 2011. P. 1- 11.
3. Афанасьева Н. Ю. Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента. Москва: КноРус, 2017. 326 с.
4. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебн. пособие. Москва: Юрайт, 2017. 194 с.

5. Ткалич В. Л., Лабковская Р. Я. Обработка результатов технических измерений. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. 72 с.
6. Аугамбаев М. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента. Ташкент: Укитувчи, 2007. 336 с.
7. Туганбаев А. А., Крупинин В.Г. Теория вероятностей и математическая статистика. Санкт-Петербург: Лань, 2011. 320 с.
8. Советов Б. Я. Яковлев С. А. Моделирование систем. Москва: Высшая школа, 2009. 343 с.
9. Симонов К. В. Вычислительный эксперимент в проблемах геомониторинга природной среды: дис. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук: 05.11.13. Красноярск, 2006. 387 с.
10. Лощев А. Г. Оптимизация технологических комплексов на основе методов планирования эксперимента: дис. на соиск. уч. степени кандидата технических наук: 05.17.04. Москва, 2010. 225 с.
11. Шерыхалина Н. М. Математическое моделирование технических объектов и процессов на основе методов многокомпонентного анализа результатов вычислительного эксперимента: автореферат дис. на соиск. уч. степени доктора технических наук: 05.13.18. Уфа, 2012. 34 с.
12. Олейник А. Г. Инструментальная система поддержки вычислительного эксперимента на примере исследования реакции лесных экосистем на техногенное воздействие: дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 05.13.16. Санкт-Петербург, 1995. 136 с.
13. Kirkpatrick S., Gelatt S., Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science*. 1983. Vol. 220. P. 671–680.
14. Бобков С. П., Бытев Д.О. Моделирование систем. Иваново, 2008. 156 с.
15. Гайдадин А. Н., Ефремова С. А. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. 16 с.
16. Мухачев В. А. Планирование и обработка результатов экспериментов. Томск: ТГУ СУР, 2007. 118 с.

17. Волкова В. Н., Козлова В. Н. Моделирование систем и процессов. Москва: Юрайт, 2015. 450 с.
18. Зикратов А. А., Зикратова Т. В., Лебедев И. С. Доверительная модель информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем с децентрализованным управлением. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 2(90). С. 47-52.
19. Babiceanu R.F., Seker R. Big data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: a survey of the current status and future outlook. *Computers in Industry*. 2016. Vol. 81. P. 128-137.
20. Гальченко В. Г., Гладкова Т. А., Берестнева О. Г. Планирование и обработка результатов экспериментов. Томск: ТПУ, 2014. 83 с.
21. Сидняев Н. И. Статистический анализ и теория планирования эксперимента. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 195 с.
22. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Методические указания по выполнению лабораторной работы по курсу «Теория планирования эксперимента». Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 32 с.
23. Сидняев Н. И., Вилисова Н. Т. Руководство к решению задач по теории планирования эксперимента. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 94 с.
24. Viksnin I. I., Zikratov I. A., Shlykov A. A., Belykh D. L., Komarov I. I., Botvin G. A. Planning of autonomous multi-agent intersection. *International Conference on Big Data and its Applications*. 2016. Vol. 6. P.01007.
25. Исакеев Д. Г., Зикратова Т. В., Лебедев И. С., Шабанов Д. П. Оценка безопасного состояния мультиагентной робототехнической системы при информационном воздействии на отдельный элемент. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. Санкт-Петербург, 2015. № 1(127). С. 43-49.
26. Шаго Ф. Н., Зикратов И. А. Оптимизация мероприятий аудита системы менеджмента информационной безопасности. *Информация и космос*. Санкт-Петербург, 2014. № 2. С. 59-65.

27. Osman I. H., Laporte G. Metaheuristics: A bibliography. Institute of Mathematics and Statistics, University of Kent, Canterbury, 1996. P. 513–628.
28. Ахназарова С. Л., Лисейчикова Е. А., Резниченко А. А. Автоматизированная система оптимального планирования и обработки экспериментальных данных PLANEX. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. Иваново, 1997. №1. С. 84-87.
29. Обзор статистических программ. URL: [http:// www. sciencefiles. ru/ section/46](http://www.sciencefiles.ru/section/46).
30. SPSS Statistics. URL: [http://www. predictivesolutions.ru /products /spss /analysis.htm](http://www.predictivesolutions.ru /products /spss /analysis.htm).
31. Обзор Statistica. URL: <http://www.statsoft.ru/products/overview>.
32. Кулаичев А.П. Методы и средства анализа данных в среде Windows. STADIA. Москва: Информатика и компьютеры, 2002. 341 с.
33. Statgraphics Центурион XVI. URL: <http://www.statgraphics.com/product/centurion.aspx> .
34. Программные продукты серии Олимп. URL: http://www.masters.donntu.edu.ua /2000/fvti /karnauh /el_bibl/ publ2.htm.
35. Центр статистических исследований URL: <http://www.riskcontrol.ru/consult.shtml>.
36. Асафьев Г. К. Современные системы имитационного моделирования. URL: http://nic1.ifmo.ru/ publications/ articles/MajorRead2009/ MREAD2009_AsafevGK.pdf .
37. Маклаков С. А. Имитационное моделирование с Arena URL: <http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/sysmod/ar1.htm>.
38. Национальное общество имитационного моделирования. Программные продукты. URL: <http://simulation.su /static/ru-soft.html>.
39. Программа VisSim и ее расширения. URL: http://model.exponenta.ru/add_ons.html.

40. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. Москва: ДМК Пресс, 2004г. 320 с.
41. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. Москва: Мир, 1978. 418 с.
42. Кузнецова Е. В. Математическое планирование эксперимента: Учебно-методическое пособие для студентов очного и заочного обучения специальностей «Технология обработки металлов давлением», «Динамика и прочность машин», «Компьютерная механика», «Компьютерная биомеханика». Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. 35 с.
43. Кононюк А. Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента) : монография. Киев: Освіта України, 2011. 456 с.
44. Губин С.В., Яковлев А. И. Теория планирования экспериментов в энергетике: курс лекций для высших технических учебных заведений. Киев: Миллениум, 2009. 158 с.
45. Воденин Д. Р., Ляликов В. Н. Эвристика Жанга для асимметричной задачи коммивояжера. *Обзор прикладной и промышленной математики*. Ульяновск, 2006. Т. 13, Вып. 6. С. 1062-1063.
46. Ляликов В. Н. Неравенства задачи о коммивояжере для задачи маршрутизации. *Обзор прикладной и промышленной математики*. Ульяновск, 2008. Т. 15, Вып. 1. С. 154.
47. Bockenhauer H.-J., Hromkovic J., Klasing R. Towards the Notion of Stability of Approximation for Hard Optimization Tasks and the Traveling Salesman Problem. *Theoretical Computer Science*. Aachen, Germany, 2002. Vol. 285. P. 3-24.
48. Кубланов М. С. Планирование экспериментов и обработка результатов измерений: пособие по изучению дисциплины, выполнению лабораторных работ и домашних заданий для студентов III курса специальности 160901 и направления 160900 дневного обучения. Москва: МГТУ ГА, 2005. 32 с.
49. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних комбінаторних планів багатofакторного експерименту» / М. Д. Кошовий, С. Г. Бестань,

В.П.Сіроклин: свід. про реєстр. автор. права на твір № 16002. - Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 17.03.2006.

50. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента. Полтава: издатель Шевченко Р. В., 2013. 317 с.

51. Скобцов Ю. А., Федоров Е. Е. Метаэвристики. Донецк : Ноулидж, 2013. 426 с.

52. Blum C., Roli A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison . *ACM Comput. Surv.* New York, USA, 2003. Vol. 35, no. 3. P. 268–308.

53. Гладков Л. А., Курейчик В. М., Курейчик, П. В., Сороколетов В. В. Биоинспирированные методы в оптимизации. Москва : Физматлит, 2010. 384 с.

54. Back T., Fogel D., Michalewicz Z. Handbook of Evolutionary Computation. Bristol, UK : IOP Publishing Ltd., 1997. 1130 p.

55. Емельянов В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. Москва: Физматлит, 2003. 432 с

56. Коп'ютерна програма «Програма синтезу планів багатofакторного експерименту» / М. Д. Кошовий, С. Г. Бестань, Г. В. Дергачова: свід. про реєстр. автор. права на твір № 18150. - Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 03.10.2006.

57. Коп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатofакторного експерименту з заданим обмеженням» / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, В. А. Дергачов: свід. про реєстр. автор. права на твір № 36589. - Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 18.01.2011.

58. Вихострумовий перетворювач : пат. 75684 Україна: МПК (2006) G01B 7/02. № U 2004021056; заявл. 13.02.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

59. Быкова В. В. Теоретические основы анализа параметризованных алгоритмов: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 180 с.
60. Дорогов В. Г., Теплова Я. О. Введение в методы и алгоритмы принятия решений: учеб. пособие. Москва: ИД ФОРУМ: ИНФРА-М, 2012. 240 с.
61. Кошевой Н. Д., Бурлеев О. Л., Костенко Е. М. Применение метода вервей и границ с введением ограничения по дополнительному критерию. *Зб. наук. пр. військ. ін.-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. Київ, 2010. Вип.28. С.29-31.
62. Колдаев В. Д. Структуры и алгоритмы обработки данных: учебное пособие. Москва: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 296 с.
63. Кормен Т. Алгоритмы. Построение и анализ. Москва: Вильямс, 2005. 1290 с.
64. Akkus A., Guvenir H.A. Nearest Neighbour Classification on Feature Projections. 1. *Proceedings of SDAIR-94, 3rd annual symposium on Document Analysis and Information Retrieval*. Rion, Greece, 1994. P. 126-138.
65. Papadimitriou C., Bently J.L. A Worst-Case Analysis of Nearest Neighbor Searching by Projection. *Automata Languages and Programming*. Reykjavik, Iceland, 1980. Vol. 85. P. 470-482.
66. Han E., Karypis G., Kumar V.. Text Categorization Using Weight Adjusted k-Nearest Neighbour Classification. *Proceedings of PAKDD-01, 5th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Hong Kong, 2001. P. 53-65.
67. Кошевой Н. Д., Чистикова З.Э. Оптимизация многофакторных планов эксперимента с помощью алгоритма ближайшего соседа. *Математичне моделювання та математична фізика: матеріали конференції «Всеукраїнська наукова конференція, присвячена 165-річчю з дня народження Софії Василівни Ковалевської»*. Кременчук, 2015. С. 47-48.
68. Глухов М. М., Шишков А. Б.. Математическая логика. Дискретные функции. Теория алгоритмов. Москва: Лань, 2012. 416 с.

69. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. Москва: Вильямс, 2013. 1324 с.
70. Котов В. М., Соболевская Е. П., Толстиков А.А. Алгоритмы и структуры данных: учеб. пособие. Минск: БГУ, 2011. 267 с.
71. Кошевой Н. Д., Бельмега А. В. Применение жадного алгоритма для оптимизации многофакторных экспериментов. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2014. Вип. 47. С. 29-37.
72. Dreoj J., Petrowski A., Siarry P., Taillard E. Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies. Berlin: Springer–Verl., 2005. 369 p.
73. Johnson D. S., Aragon C. R., McGeoch L. A., Schevon C. Optimization by simulated annealing: An experimental evaluation. *INFORMS Operations Research*. USA, 1989. Vol. 7. P. 865–891.
74. Кочетов Ю. А. Вероятностные методы локального поиска для задач дискретной оптимизации. Дискретная математика и ее приложения. Москва: МГУ, 2001. С. 87–117.
75. Кошевой Н. Д., Бельмега А. В., Чистикова З. Э. Применение алгоритма имитации отжига для оптимизации многофакторных планов эксперимента. *Системи обробки інформації*. Харків: ХУПС ім. Кожедуба, 2015. Вип. 6(131). С. 103-106.
76. Лебедев Б. К., Лебедев О. Б. Моделирование адаптивного поведения муравьиной колонии при поиске решений, интерпретируемых деревьями. *Известия ЮФУ. Технические науки*. Таганрог, 2012. № 7 (132). С. 27-34.
77. Dorigo M. , Maniezzo V., Colorni A. Ant System: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1996. Vol. 26, no. 1. P. 29–41.
78. Dorigo M. Ant Colony Optimization. Universit'eLibre de Bruxelles, BELGIUM :MIT Press, 2004. 319 p.

79. Dorigo M., Gambardella L. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 1997. Vol. 1, no. 1. P. 53–66.
80. Stützle T., Hoos H. MAX MIN Ant System. *Future Generation Computer Systems*. Amsterdam, 2000. Vol. 16. P. 889–914.
81. Кажаров А. А., Курейчик В. М. Использование шаблонных решений в муравьиных алгоритмах. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. Таганрог, 2013. № 7 (144). С. 17-22.
82. Ватутин Э.И., Титов В.С. Анализ результатов применения алгоритма муравьиной колонии в задаче поиска пути в графе при наличии ограничений. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. Таганрог, 2014. № 12 (161). С. 111–120.
83. Ватутин Э. И., Титов В. С. Об одном подходе к использованию алгоритма муравьиной колонии при решении задач дискретной комбинаторной оптимизации. *Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект 2015)*. Тула, 2015. С. 8–13.
84. Кошевой Н. Д., Чуйко А. С. Оптимизация планов экспериментов с использованием алгоритма муравьиной системы. *Метрологія та прилади*. Харьков, 2013. № 2 II (40). С.135-137.
85. Курейчик В. В., Заруба Д. В., Запорожец Д. Ю. Применение генетического алгоритма решения задачи трехмерной упаковки. *Известия ЮФУ. Технические науки*. Таганрог, 2012 г. С.8-14.
86. Серебряков В.А. Теория и реализация языков программирования. Москва: Физматлит, 2012. 236 с.
87. Ясницкий Л. Н. Искусственный интеллект. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 197 с.
88. Кошевой Н. Д., Сухобрус Е. А. Оптимальное планирование эксперимента с использованием генетических алгоритмов. *Математичне моделювання*.

Дніпродзержинськ: Дніпродзержинський державний технічний університет, 2013. Вип. 2(29). С. 36-40.

89. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимального або близького до оптимального за вартістю реалізації багаторівневого плану багатofакторного експерименту» / М. Д. Кошовий, О. А. Сухобрус : свід. про реєстрацію авторського права на твір № 43182. - Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 09.04.2012.

90. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимального за вартістю реалізації плану експерименту з використанням генетичних алгоритмів» / М. Д. Кошовий, О. А. Сухобрус : свід. про реєстрацію авторського права на твір № 50203. - Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 15.07.2013.

91. Goetz B., Peierls T., Bloch J. Java Concurrency in Practice Brian. Москва: Sun Press, 2012 . 983 с.

92. Hoskins D.S. Combinatorics and Statistical Inferecing. *Applied Optimal Designs*. 2007. № 4. P. 147-179.

93. Morgan J.P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. *Journal of the American Statistical Association*. 2005. Vol.100. № 471. P. 1092-1093.

94. Bailey R. A., Cameron P. G. Combinatorics of optimal designs. *Surveys in Combinatorics*. London, 2009. Vol. 365. P. 19-73.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ПРОГРАМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Експериментальні методи широко використовуються як в науці, так і в промисловості. Тому важливого значення набуває збільшення ефективності експериментальних досліджень, що спрямовані на отримання адекватної математичної моделі виробничого процесу. Як наслідок експериментатори прагнуть отримати такі моделі з мінімальними часовими і вартісними витратами. Найбільш перспективний засіб вирішення цього завдання - застосування методів планування експерименту (МПЕ).

Задача отримання мінімальної вартості проведення експерименту є NP-повною, тому точне рішення можливо знайти тільки для невеликої кількості вихідних факторів. А для числа факторів $k > 4$ кількість перестановок різко збільшується та на сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки точно вирішити задачу неможливо. Як наслідок стає актуальною задача дослідження і розроблення наближених, у тому числі метаевристичних алгоритмів.

2.1 Постановка задачі оптимізації планів БФЕ

Планування експерименту дозволяє вирішити задачу отримання математичної моделі при мінімальних вартісних і часових витратах [1, 2]. Отже, необхідно синтезувати план експерименту, який має мінімальну вартість проведення. На вартість реалізації експерименту істотно впливає порядок чергування рівнів зміни факторів. Найчастіше зустрічаються такі фактори, як температура, концентрація реагуючих речовин, час реакції, тиск та інші, які своєю чергою потребують різних витрат на зміну рівнів.

У загальному випадку задачу вибору оптимального плану багатofакторного експеримента може бути сформульовано таким чином.

Задача оптимізації планів експериментів за вартісними витратами є NP-повною, тобто для свого рішення потребує часу і великої кількості обчислень, що швидко зростають із збільшенням розмірності задачі. По-цьому повний перебір усіх можливих варіантів рішення є важкою задачею. Зі зростанням кількості факторів (k) число перетворень істотно зростає. У таблиці 2.1 наведено значення кількості факторів і кількості перетворень для $k = 2 \dots 5$. При синтезі оптимального плану експерименту з кількістю фактором більше чотирьох виникає ще й проблема тривалості його побудови.

Таблиця 2.1 - Кількість перетворень планів БФЕ для $k = 2 \dots 5$

Кількість факторів	Кількість дослідів у плані БФЕ	Кількість перетворень
2	4	24
3	8	40320
4	16	2.092×10^{13}
5	32	$2,63 \times 10^{35}$

У зв'язку з цим необхідно знаходити рішення за допомогою наближених методів, наприклад, таких, як методи оптимізації шляхом перестановки стовпців матриці планування, табу-пошуком, роєм часток. При цьому заданий вихідний план експерименту X_{3E} та матриця вартостей переходів рівнів факторів C_{nep} :

$$X_{3E} = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & \dots & X_i^1 & \dots & X_k^1 \\ X_1^2 & X_2^2 & \dots & X_i^2 & \dots & X_k^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^j & X_2^j & \dots & X_i^j & \dots & X_k^j \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^N & X_2^N & \dots & X_i^N & \dots & X_k^N \end{bmatrix},$$

$$C_{nep} = \begin{bmatrix} C_{(+1)}^1 & C_{(-1)}^1 & C_{(+1)(-1)}^1 & C_{(-1)(+1)}^1 \\ C_{(+1)}^2 & C_{(-1)}^2 & C_{(+1)(-1)}^2 & C_{(-1)(+1)}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(+1)}^i & C_{(-1)}^i & C_{(+1)(-1)}^i & C_{(-1)(+1)}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(+1)}^k & C_{(-1)}^k & C_{(+1)(-1)}^k & C_{(-1)(+1)}^k \end{bmatrix},$$

де X_i^j - значення і-го фактора досліджуємого процесу в j-ому досліді;

k – кількість факторів об'єкта, уведених в дослідження;

N – кількість дослідів у матриці планування експерименту і матриці вартостей переходів із рівнів факторів;

$C_{0(+1)}^i, C_{0(-1)}^i, C_{0(+1)(-1)}^i, C_{0(-1)(+1)}^i$ - вартості переходів з відповідних рівнів для і-го фактора.

Необхідно знайти оптимальний або близький до оптимального план експерименту X_{3E}^{opt} , при виконанні обмеження на кількість ітерацій $l=l_{зад}$, для якого сумарна вартість проведення експерименту C_0 за формулою:

$$C_0 = \sum_{i=1}^k C_i^{a_i,1} + \sum_{j=2}^N \sum_{i=1}^k C_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}} \rightarrow \min,$$

де C_0 - сумарна вартість проведення експерименту, ум.од.;

$C_i^{a_i,1}$ - вартість установки і-го фактора у стан $a_{i,1}$ у першому досліді, ум.од.;

$C_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}}$ - вартість установки і-го фактора в j-ому досліді, ум.од.

2.2 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на перестановці стовпців матриці планування, та відповідне програмне забезпечення

Розроблено метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на перестановці стовпців матриці планування [3] і відповідне програмне забезпечення [4], що його реалізує.

У конкретних задачах оптимального проектування досить часто залежність критерію оптимальності від параметрів проектування виходить занадто складною. У цих випадках використовують методи випадкового пошуку. Незважаючи на досить великий обсяг обчислень (до кількох сотень тисяч

циклів), метод випадкового пошуку виявляється ефективним унаслідок високої швидкодії і особливо тоді, коли кількість шуканих параметрів синтезу велике.

Метод випадкового пошуку досить простий, дозволяє оглянути всю область можливих значень параметрів синтезу, але потребує великого обсягу обчислень. Кількість прораховуваних варіантів іноді досягає десятків і навіть сотень тисяч. Метод синтезу оптимальних планів багатфакторного експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування базується на тому, що при одній і тій же кількості випробувань імовірність отримання рішення, близького до оптимального, при випадковому пошуку більше, ніж при послідовному переборі через рівні інтервали зміни окремих параметрів.

Метод випадкового пошуку не потребує обчислення похідних цільової функції за визначальними її змінними. Перевагами цього методу є його простота, стійкість й інтуїтивна зрозумілість. Недоліками - низька швидкість збіжності, а також невизначеність у виборі умови зупинки. У разі простих цільових функцій метод випадкового пошуку менш ефективний, за будь-яку регулярну процедуру, але виявляється корисним у більш складних випадках, коли цільова функція настільки складна, що неможливо заздалегідь установити будь-які її властивості, що дозволяють раціонально вибирати напрями пошуку. Випадковий пошук дозволяє оптимізувати будь-яку функцію, хоча і з різною (іноді дуже низькою) ефективністю.

Сутність застосування методу перестановки стовпців матриці планування, схему якого наведено на рисунку 2.2, полягає у такому.

Крок 1. На початку роботи програми відбувається введення кількості факторів k .

Крок 2. Уведення вартості переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 3. У залежності від вибраної кількості факторів здійснюється побудова матриці планування експерименту.

Крок 4. Обчислюється вихідна вартість проведення експерименту.

Крок 5. Формування лічильників ітерацій l .

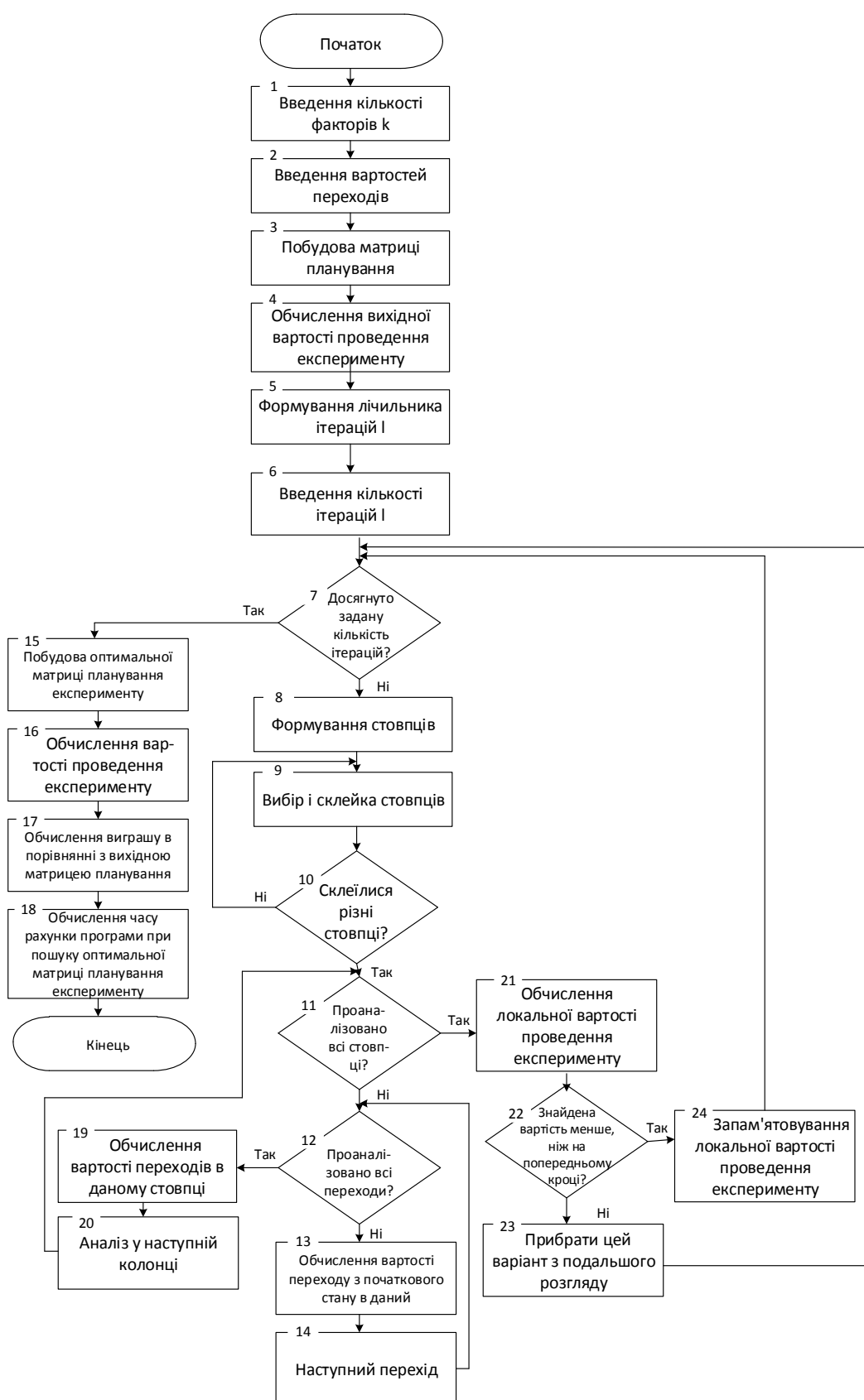


Рисунок 2.2 - Схема реалізації методу оптимізації планів експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування

Крок 6. Здійснюється уведення кількості ітерацій l .

Крок 7. Виконується перевірка, чи досягнуто заданої кількості ітерацій чи ні. Якщо досягнуто, то виконується крок 15, інакше - крок 8.

Крок 8. В залежності від кількості факторів k відбувається формування стовпців.

Крок 9. Залежно від кількості факторів k відбувається склеювання стовпців.

Крок 10. Здійснюється перевірка, чи склеїлися різні стовпці. Якщо склеїлися різні, то виконується крок 11, інакше - крок 9.

Крок 11. Здійснюється перевірка, проаналізовано всі стовпці чи ні. Якщо всі, то переходимо на крок 21, інакше - крок 12.

Крок 12. Здійснюється перевірка, чи всі переходи проаналізовано. Якщо всі проаналізовано, то виконується крок 19, інакше - крок 13.

Крок 13. Виходячи з аналізу вартостей переходів з «-1» в «+1» і з «+1» в «-1» і якщо в стовпці відбулася зміна значення рівня фактора, то значення вартості переходів записуються в матрицю.

Крок 14. Здійснюється перехід до аналізу наступного $(i + 1)$ переходу.

Крок 15. Після досягнення заданої кількості ітерацій виконується побудова оптимальної матриці планування експерименту (ґрунтується на тому, що якщо на кожному локальному етапі вибирався оптимальний перехід, то і загальний план проведення експерименту буде оптимальним).

Крок 16. Обчислюється загальна вартість реалізації експерименту.

Крок 17. Обчислюється величина виграшу B як відношення вихідної вартості проведення експерименту $C_{вих}$, знайденої на кроці 4, до вартості проведення експерименту C_{min} , знайденої на кроці 16.

Крок 18. Обчислюється час t , витрачений на оптимізацію плану багатфакторного експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування.

Крок 19. Обчислюється вартість переходів у j стовпці, як сума всіх значень, знайдених на кроці 12.

Крок 20. Здійснюється перехід до аналізу наступного ($j + 1$) стовпчика.

Крок 21. Обчислюється локальна вартість проведення експерименту.

Крок 22. Виконується перевірка, чи менше вартість, знайдена на кроці 21, за вартість, обчислену під час попередньої ітерації. Якщо менше, то здійснюється перехід на крок 24, в іншому випадку відбувається перехід на крок 23.

Крок 23. Оскільки ми отримали вартість більше, за попередню ітерацію, то потрібно виключити цей варіант з розгляду.

Крок 24. Здійснюється запам'ятовування локальної вартості проведення експерименту, а потім виконується перехід на крок 7.

Було розроблено програмне забезпечення, що реалізує метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування [4]. Мова програмування - Java. Прорахунки виконувалися на комп'ютері з процесором Intel Pentium G620 з частотою 2.60 GHz.

Файл початкових даних зберігається в форматі txt і вводиться користувачем з клавіатури:

ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ «+1»→ «-1» 0,2;1,55;7,4;6,9 «-1»→ «+1» 0,2;4,9;8,8;7,9

// Формування основного «тіла» програми

```
int main()
{setlocale(LC_ALL, "rus");
int input_mas[2][7];
int n;
int read_result = read_data_from_file(input_mas, &n);
if(read_result == 0)
{int** P_matrix = make_P_matrix(n);
int** summary_matrix = make_summary_matrix(input_mas, P_matrix, n);
```

```

print_summary_matrix_on_screen(P_matrix, summary_matrix, n);
print_summary_matrix_in_file(P_matrix, summary_matrix, n);
tabu_search(summary_matrix, n);}
system("pause");
return 0;}

```

// Зчитування вхідних даних і формування початкової матриці планування експерименту

```

int read_data_from_file(int input_mas[][7], int* n)
{char buff[50];
int return_value = 0;
int i = 0;
int j[2];
memset(j, 0, 8);
ifstream fin("input_data.txt");
ofstream fout("output_data.txt");
for(int i = 0; i < 2; i++)
{fin.getline(buff,50);
string str(buff);
stringstream stream(str);
do
{stream>>input_mas[i][j[i]];
j[i]++;
}while (!stream.eof());}
if(j[0] != j[1] || j[0] > 7)
{return_value = 1;}
else{
*n = j[0];
cout<<" ";
for(int i = 1; i <= *n; i++)
{cout<<i<<' '<<' ';}
cout<<"\n\n0->1 ";
for(int i = 0; i < *n; i++)
{if(input_mas[0][i]<10)
cout<<input_mas[0][i]<<' '<<' '};
else
cout<<input_mas[0][i]<<' '};
}cout<<"\n1->0 ";

```

```

for(int i = 0; i < *n; i++)
{if(input_mas[1][i]<10)
cout<<input_mas[1][i]<<' '<<' ';
else
cout<<input_mas[1][i]<<' ';}
cout << "\n\nДані введено коректно"<<endl<<endl;
return_value = 0;}
fin.close();
fout.close();
return return_value;}

```

// Процедура формування матриці планування експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування)

```

int** make_P_matrix(int n)
{int i = (int)pow(2.0,n);
int j = n;
int** P_matrix = new int* [i];
for(int q = 0; q < i; q++)
{P_matrix[q] = new int [j];}
int* temp_mas = new int [j];
memset(temp_mas, 0, sizeof(int)*j);
memcpy(P_matrix[0], temp_mas, sizeof(int)*j);
int max_pos = j;
for(int q = 1; q < i; q++)
{int curr_pos = j-1;
do
{temp_mas[curr_pos]++;
if(temp_mas[curr_pos] > 1)
{temp_mas[curr_pos] = 0;
curr_pos--;}
else
break;}
while(true);
memcpy(P_matrix[q], temp_mas, sizeof(int)*j);}
return P_matrix;}
int get_summ_for_2_position(int temp_mas[][7], int input_mas[][7], int n)
{int local_sum = 0;

```

```

for(int q = 0; q < n; q++)
{if(temp_mas[0][q] != temp_mas[1][q])
{if(temp_mas[0][q] == 0)
local_sum += input_mas[0][q];
else
local_sum += input_mas[1][q];}}
return local_sum;}

int** make_summary_matrix(int input_mas[][7], int** P_matrix, int n)
{int i = (int)pow(2.0,n);
int j = n;
int temp_mas[2][7];
int** summary_matrix = new int* [i];
for(int q = 0; q < i; q++)
{summary_matrix[q] = new int [i];}
for(int q = 0; q < i; q++)
{for(int w = 0; w < i; w++)
{if(q == w)
{summary_matrix[w][q] = 0;}
Else
{memcpy(temp_mas[0], P_matrix[w], sizeof(int)*j);
memcpy(temp_mas[1], P_matrix[q], sizeof(int)*j);
summary_matrix[w][q] = get_summ_for_2_position(temp_mas, input_mas,
j);}}}
return summary_matrix;}

```

//Процедура виводу даних

```

void print_summary_matrix_on_screen(int** P_matrix, int** summary_matrix,
int n)
{int i = (int)pow(2.0,n);
int j = n;
if(n>4)
cout<<"Зведена матриця проведення експерименту \n\n";
for(int q = 0; q < j; q++)
{for(int z = 0; z < j+1; z++)
{cout<<' '<<' ';}
for(int w = 0; w < i; w++)
{cout<<P_matrix[w][q]<<' '<<' ';}

```

```

cout<<endl;}
cout<<endl;
for(int q = 0; q < i; q++)
{for(int w = 0; w < j; w++)
{cout<<P_matrix[q][w]<<' ';}
cout<<' '<<' ';
for(int w = 0; w < i; w++)
{if(summary_matrix[q][w]<10)
cout<<summary_matrix[q][w]<<' '<<' ';
else
cout<<summary_matrix[q][w]<<' ';}
cout<<endl;}
cout<<"\n\n\n\n";}

```

Результати зберігаються у форматі txt окремим файлом, який має вигляд:

ФАЙЛ РЕЗУЛЬТАТУ

Мінімальна вартість проведення експерименту = 114,25

Послідовність проведення дослідів: 1 10 14 16 8 4 12 5 13 2 6 9
7 11 3 15

Послідовність дослідів з мінімальною вартістю знайдена на кроці: 287

2.3 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на їх оптимізації табу-пошуком, та відповідне програмне забезпечення

Розроблено метод оптимізації планів експерименту за вартісними витратами табу-пошуком і створено програму, що його реалізує [5]. Алгоритм табу-пошуку є метаевристикою, яка основана на локальному пошуку. Головна ідея алгоритму табу-пошуку полягає у постійній локальній модифікації поточного рішення завдання при запам'ятовуванні проведених змін - щоби запобігти потрапляння алгоритму у повторну побудову неефективних рішень і зациклен-

ня процедури пошуку вирішення. На кожному кроці ітерації як нове поточне рішення вибирається краще рішення біля поточного, навіть якщо це призводить до збільшення вартості рішення. Таким чином, метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту табу-пошуком дозволяє уникнути поганих локальних оптимумів.

До програми, що реалізовує метод синтезу оптимальних планів багатфакторного експерименту табу-пошуком, було додано нові вхідні параметри, такі, як кількість кроків алгоритму, кількість разів, коли алгоритм доходить до локального мінімуму без поліпшень. Другий параметр було введено для того, щоб можна було закінчити роботу алгоритму. При досягненні локального мінімуму алгоритм не зупиняється, а виконує дію, яка найменше погіршує цільову функцію, потім заносить її в табу лист і продовжує роботу. Тим самим ми можемо зрушити з локального мінімуму і перейти в інший. У цьому алгоритмі на першому кроці відбувається перевірка табу-листа, по-перше, на зменшення для кожного елемента кількості кроків у табу-аркуші, по-друге, на видалення тих елементів, лічильник яких досяг нуля.

Так само зміни відбулися в першому циклі. По-перше, вибирається не найоптимальніша дія, а перша дія, яка приносить поліпшення. По-друге, при виборі дії перевіряється, чи не лежить вона в табу-листі. Таким чином це допомагає нам не повертатися назад у той же локальний мінімум. Однак якщо дія, що лежить в табу-аркуші, усе ж покращує рішення до такого, що воно краще найкращого відомого, то ця дія відбувається і видаляється з табу-списку.

Невеликі відмінності від попереднього алгоритму є в моменті після знаходження локального мінімуму. По-перше, йде перевірка, поліпшили ми чи ні поточне оптимальне рішення, якщо так, то алгоритм зберігає нове оптимальне, обнуляє кількість невдач (fails) і продовжує роботу. Якщо ж алгоритм не знайшов рішення краще, за поточне оптимальне, то кількість невдач збільшується на одиницю, порівнюється з глобальним параметром. Якщо кількість невдач зрівнялася з фіксованим числом, то алгоритм зупиняється. Якщо алго-

ритм не зупинено, то програма знаходить дію, яка призводить до найменшого погіршення цільової функції, виконує її і додає зворотну дію в табу-список на певну кількість кроків.

Метод синтезу оптимальних комбінаторних планів табу-пошуком дозволяє відійти від таких недоліків методів локального пошуку, як передчасна збіжність алгоритму і велика залежність кінцевого результату від вибору початкового наближення рішення.

Сутність застосування методу, схему якого наведено на рисунку 2.2, полягає у такому.

Крок 1. На початку роботи програми відбувається введення кількості факторів k .

Крок 2. Залежно від вибраної кількості факторів здійснюється побудова матриці планування експерименту.

Крок 3. Вводиться вартість переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 4. Обчислюється вихідна вартість проведення експерименту.

Крок 5. Створюється початкове рішення x і безлічі $x^* = \{x\}$.

Крок 6. Формуються лічильники ітерацій для кількості кроків N і довжини списку заборон L .

Крок 7. Виконується перевірка, чи досягнуто заданої кількості ітерацій чи ні. Якщо досягнуто, то виконується крок 23, в іншому випадку крок 8.

Крок 8. Виконується перебір усіх можливих дослідів y ($y=2^k$) при плануванні експерименту. Якщо проаналізовано переходи усіх дослідів, то виконується крок 12, в іншому випадку - крок 9.

Крок 9. Виконується перебір усіх можливих переходів з поточного стану в стан, заданий у вихідній матриці планування експерименту. Якщо проаналізовано всі можливі переходи з поточного стану, то виконується крок 13, в іншому випадку - крок 10.

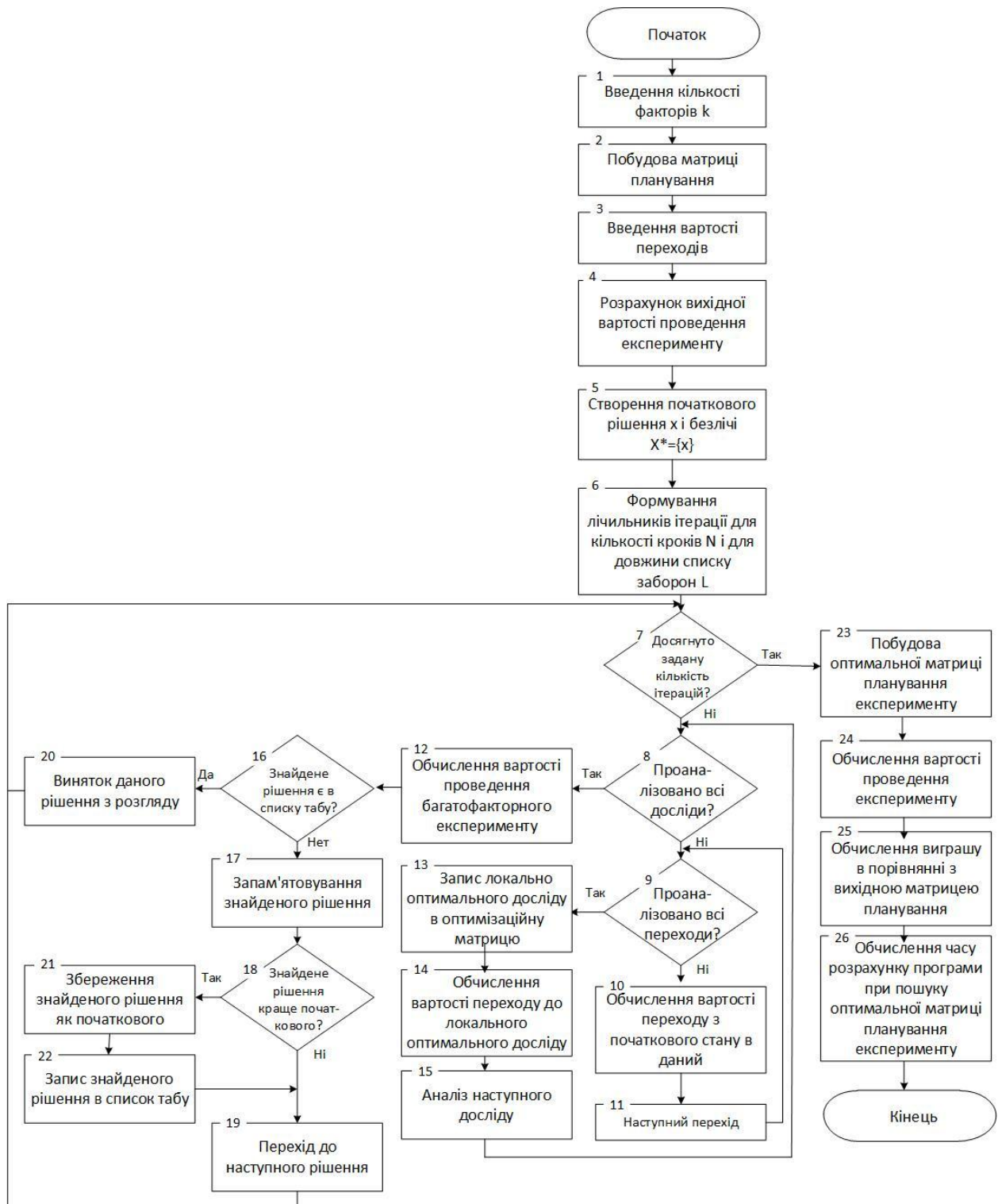


Рисунок 2.2 - Схема реалізації методу оптимізації планів експерименту табу-пошуком

Крок 10. Обчислюється вартість переходу з початкового стану в поточний (для і-го варіанта переходу).

Крок 11. Здійснюється перехід до аналізу наступного ($i + 1$) переходу.

Крок 12. Проводиться обчислення вартості проведення багатофакторного експерименту як суми всіх локально оптимальних вартостей переходів, отриманих на кроці 10.

Крок 13. Виходячи з аналізу всіх можливих варіантів переходів з початкового стану в локально оптимальний стан (за якого вартість переходу буде мінімальною) записується цей локально оптимальний дослід в оптимізаційну матрицю.

Крок 14. На основі вибору локально оптимального дослідів обчислюється вартість переходу до цього дослідів і записується в загальну вартість проведення експерименту.

Крок 15. Вибирається наступний дослід для аналізу і перевірки.

Крок 16. Здійснюється перевірка, чи перебуває знайдене рішення в списку табу. Якщо знаходиться, то виконується крок 20, в іншому випадку крок 17.

Крок 17. Запам'ятовується знайдене рішення.

Крок 18. Виконується порівняння знайденого рішення з початковим. Якщо знайдене рішення краще початкового, то виконується крок 21, в іншому випадку - крок 19.

Крок 19. Здійснюється перехід до пошуку наступного рішення.

Крок 20. Відбувається видалення знайденого рішення з подальшого розгляду, оскільки воно знаходиться в списку табу. Це дозволяє уникнути локальних оптимумів.

Крок 21. Здійснюється збереження знайденого рішення як початкового для порівняння з ним подальших варіантів.

Крок 22. Виконується запис знайденого рішення в список табу.

Крок 23. Після досягнення заданої кількості ітерацій виконується побудова оптимальної матриці планування експерименту (ґрунтується на тому, що якщо на кожному локальному етапі вибирався оптимальний перехід, то і загальний план проведення експерименту буде оптимальним).

Крок 24. Обчислюється загальна вартість реалізації експерименту.

Крок 25. Обчислюється величина виграшу B як відносини вихідної вартості проведення експерименту $C_{\text{вих}}$, знайденої на кроці 4, до вартості проведення експерименту C_{min} , знайденої на кроці 24.

Крок 26. Обчислюється час t , витрачений на оптимізацію плану багатofакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку.

Було розроблено програмне забезпечення, що реалізує метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту табу-пошуком [5 - 7]. Мова програмування - Java. Прорахунки виконувалися на комп'ютері з процесором Intel Pentium G620 з частотою 2.60 GHz. Кількість факторів і вартості переходів рівнів факторів вводяться з клавіатури у діалоговому режимі користувачем.

Файл початкових даних зберігається в форматі txt, вводиться користувачем з клавіатури і для програми [5] має вигляд:

ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ	
«-1»→ «+1»	2,1,3,4,1
«+1»→ «-1»	1,3,2,1,3

//Формування «тіла» програми (процедури виклику підпрограм)

```
int main()
{setlocale(LC_ALL, "rus");
int input_mas[2][7];
int n;
int read_result = read_data_from_file(input_mas, &n);
if(read_result == 0)
{int** P_matrix = make_P_matrix(n);
```



```

cout<<"\n\n0->1 ";
for(int i = 0; i < *n; i++)
{if(input_mas[0][i]<10)
cout<<input_mas[0][i]<<' '<<' ';
else
cout<<input_mas[0][i]<<' ';
}cout<<"\n1->0 ";
for(int i = 0; i < *n; i++)
{if(input_mas[1][i]<10)
cout<<input_mas[1][i]<<' '<<' ';
else
cout<<input_mas[1][i]<<' ';}
cout << "\n\n Дані введено коректно"<<endl<<endl;
return_value = 0;}
fin.close();
fout.close();
return return_value;}

```

//Ініціалізація табу-пошуку

```

int tabu_search(int** summary_matrix, int n)
{cout<<"Виконується пошук мінімальної вартості експеримента за допомогою
алгоритма табу-пошука.\n";
cout<<"Якщо N>4 пошук виконується тривалий час. Дочекайтеся відображен-
ня результату пошука перед закриттям програми!!!!!!\n\n";
system("pause");
TSPEnvironment *tspEnvironment = new TSPEnvironment();
n = (int)pow(2.0,n);
vector<vector<int>> start_vector;

```

```

for(int i = 0; i < n; i++)
{vector<int> temp_vector;
for(int j = 0; j < n; j++)
{temp_vector.push_back(summary_matrix[i][j]);}
start_vector.push_back(temp_vector);}

```

//Формування початкової матриці планування експерименту та розрахунок вартості проведення експерименту

```

tspEnvironment->distances = start_vector;
vector<int> currSolution;
for(int i = n; i > 1; i--)
{currSolution.push_back(i-1);}
std::random_shuffle (currSolution.begin(), currSolution.end(), myrandom);
currSolution.insert(currSolution.begin(), 0);
currSolution.push_back(0);
int numberOfIterations = n*10;
int tabuLength = n*2;
int step_on_best_solution = 0;
TabuList *tabuList = new TabuList(tabuLength);
vector<int> bestSol;
for(unsigned int i = 0; i < currSolution.size(); i++)
{bestSol.push_back(currSolution[i]);}
int bestCost = tspEnvironment->getObjectiveFunctionValue(bestSol);
cout <<"Шаг 0"<<".\t Початкова вартість експеримента = " << tspEnvironment->
getObjectiveFunction Value(currSolution) << ".\t Початкова послідовність : ";
printSolution(bestSol);

```


//Розрахунок поточної вартості проведення експерименту

```
for (int i = 0; i < numberOfIterations; i++)
{currSolution = getBestNeighbour(tabuList, tspEnvironment, currSolution);
int currCost = tspEnvironment->getObjectiveFunctionValue(currSolution);
cout <<"Виконується крок "<< i+1 <<".\t Поточна вартість експеримента = " <<
tspEnvironment->getObjectiveFunctionValue(currSolution)<<endl;
if (currCost < bestCost)
{if(currCost == 37)
system("pause");
bestSol.clear();
for(unsigned int q = 0; q < currSolution.size();q++)
{bestSol.push_back(currSolution[q]);}
bestCost = currCost;
step_on_best_solution = i+1;}}
printSolution(bestSol);
print_solution_in_file(bestSol.data(), bestSol.size(), bestCost,
step_on_best_solution);
return 0;}
```

//Перевірка, чи знаходиться поточне знайдене рішення у списку табу та перехід до розрахунку наступної оптимальної вартості проведення експерименту

```
vector<int> getBestNeighbour(TabuList *tabuList, TSPEnvironment
*tcpEnvironment, vector<int> &initSolution)
{vector<int> bestSol; //this is the best Solution So Far
for(unsigned int i = 0; i < initSolution.size(); i++)
{bestSol.push_back(initSolution[i]);}
```

```

int bestCost = tcpEnvironment->getObjectiveFunctionValue(initSolution);
int city1 = 0;
int city2 = 0;
bool firstNeighbor = true;
for (unsigned int i = 1; i < bestSol.size() - 1; i++)
{for (unsigned int j = 2; j < bestSol.size() - 1; j++)
{if (i == j)
{continue;}
vector<int> newBestSol; //this is the best Solution So Far
for(unsigned int q = 0; q < bestSol.size(); q++)
{newBestSol.push_back(bestSol[q]);}
newBestSol = swapOperator(i, j, initSolution); //Try swapping cities i and j
// , maybe we get a bettersolution
int newBestCost = tcpEnvironment->getObjectiveFunctionValue(newBestSol);
if ((newBestCost < bestCost || firstNeighbor) && tabuList->tabuList[i][j] == 0)
{ //if better move found, store it
firstNeighbor = false;
city1 = i;
city2 = j;
bestSol.clear();
for(unsigned int q = 0; q < newBestSol.size(); q++)
{bestSol.push_back(newBestSol[q]);}
bestCost = newBestCost;}}}
if (city1 != 0) {tabuList->decrementTabu();
tabuList->tabuMove(city1, city2);}
return bestSol;}

void printSolution(vector<int> solution)
{for (unsigned int i = 0; i < solution.size(); i++)
{cout << solution[i] << " ";} cout << endl;}

```

```
vector<int> swapOperator(int city1, int city2, vector<int> &solution)
{swap(solution[city1], solution[city2]);
return solution;}
```

Файл результату зберігається у форматі txt окремим файлом у папці з програмою і має вигляд:

ФАЙЛ РЕЗУЛЬТАТУ

Мінімальна вартість проведення експерименту = 71
 Послідовність проведення дослідів: 24 26 10 11 27 19 22 30 31 23 21 29
 13 15 14 6 7 3 2 18 16 8 9 25 17 1 5 4 20 28 12
 Послідовність дослідів з мінімальною вартістю знайдена на кроці: 245

Розроблене програмне забезпечення було також адаптовано для оптимізації трирівневих планів багатофакторного експерименту [6], для якого вхідний файл має вигляд:

ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ

«0»→ «-1» 3,3,3
 «0»→ «+1» 2,2,2
 «-1»→ «+1» 5,5,5
 «+1»→ «-1» 5,5,5
 «-1»→ «0» 3,3,3
 «+1»→ «0» 2,2,2

Для оптимізації композиційних планів другого порядку за допомогою програми [7] файл початкових даних має вигляд:

ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ

$\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -1 \rangle\rangle$ 40,10,2,3
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle 0 \rangle\rangle$ 140,30,7,2
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +1 \rangle\rangle$ 240,50,12,2
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 280,58,14,1
 $\langle\langle -1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -\alpha \rangle\rangle$ 20,2,6,4
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 280,58,14,1
 $\langle\langle -1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle 0 \rangle\rangle$ 100,30,5,2
 $\langle\langle -1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +1 \rangle\rangle$ 200,50,10,2
 $\langle\langle -1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 240,58,12,1
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 280,58,14,1
 $\langle\langle 0 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -\alpha \rangle\rangle$ 70,2,21,4
 $\langle\langle 0 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -1 \rangle\rangle$ 50,10,15,3
 $\langle\langle 0 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +1 \rangle\rangle$ 100,50,5,2
 $\langle\langle 0 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 140,58,7,1
 $\langle\langle +1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -\alpha \rangle\rangle$ 120,2,36,4
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 280,58,14,1
 $\langle\langle +1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -1 \rangle\rangle$ 100,10,30,3
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 280,58,14,1
 $\langle\langle +1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle 0 \rangle\rangle$ 50,30,15,2
 $\langle\langle -\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 280,58,14,1
 $\langle\langle +1 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +\alpha \rangle\rangle$ 40,58,2,1
 $\langle\langle +\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -\alpha \rangle\rangle$ 140,2,42,4
 $\langle\langle +\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle -1 \rangle\rangle$ 120,10,36,3
 $\langle\langle +\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle 0 \rangle\rangle$ 70,30,21,2
 $\langle\langle +\alpha \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle +1 \rangle\rangle$ 20,50,6,2

Безпосередньо метод табу-пошуку для оптимізації трирівневих і композиційних планів другого порядку має структуру, аналогічну дворівневим.

2.4 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на їх оптимізації роєм часток, та відповідне програмне забезпечення

Розроблено метод оптимізації планів експерименту за вартісними витратами роєм часток [8]. Метод рою часток базується на моделюванні поведінки популяції часток у просторі параметрів задачі оптимізації. У методі рою часток кожна частинка є можливим рішенням. Вона характеризується позицією у просторі пошуку і швидкістю переміщення. Частки переміщуються у просторі відповідно до «принципу найкращого знайденого в просторі положення, яке постійно змінюється при знаходженні частинками більш вигідних положень». Таким чином знаходиться оптимум функції.

Рій часток завжди діє скоординовано, кожна частка переміщується згідно з простим правилом, стежить за іншими частинками і погоджує свій рух з ними. Знайшовши джерело їжі, частка повідомляє про нього всій зграї. Саме цей факт створює колективну поведінку і ройовий інтелект. Джерела їжі зазвичай розташовані довільно, і одній частці дуже складно швидко знайти її. Тільки в тому випадку, якщо частки будуть обмінюватися інформацією, уся зграя зможе вижити. Вводяться такі положення:

- частки існують у світі, де час дискретний;
- частки оцінюють своє становище за допомогою фітнес-функції;
- кожна частка знає позицію в просторі, в якій вона знайшла найбільшу кількість їжі (своя найкраща позиція);
- кожна частка знає позицію в просторі, в якому знайдено найбільшу кількість їжі серед усіх позицій, в яких були всі частки (загальна найкраща позиція);
- частки мають тенденцію прагнути до кращих позицій, в яких були самі, і до загальної найкращої позиції;

- частки доволіно змінюють свою швидкість так, що описана тенденція визначає лише усереднений рух часток;

- частки мають інерцією, тому їх швидкість в кожен момент часу залежить від швидкості в попередній момент;

- частки не можуть покинути задану область пошуку.

Спочатку вводяться кількість чинників і вартість переходу для кожного рівня факторів. Потім з урахуванням уведених даних формується зведена матриця планування експерименту. Частки розкидані випадково по всій зведеній матриці планування експерименту, і кожна частинка має випадковий вектор швидкості. Після цього частинки починають рухатися по рядках і стовпцях матриці.

У кожній точці, де побувала частинка, розраховується значення вартості проведення експерименту. При цьому кожна частка запам'ятовує, яке краще значення вартості експерименту вона особисто знайшла і де розташована точка, яка є кращою серед усіх точок, які розвідали частки. На кожній ітерації частки коригують свою швидкість (модуль і напрямок), щоб з одного боку бути ближче до кращої точки, яку вона знайшла сама і, в той же час наблизитися до точки, яка в даний момент є глобально кращою.

Через деяку кількість ітерацій частки збираються поблизу найбільш оптимальної точки. Потім коригується поточна координата кожної частки. Після цього розраховується значення вартості проведення експерименту в кожній новій точці, кожна частка перевіряє, чи не стала нова координата кращою серед усіх точок, де вона побувала.

Потім серед усіх нових точок здійснюється перевірка, чи не знайшли ми нову глобально кращу точку, і, якщо знайшли, запам'ятовуються її координати і значення вартості проведення експерименту в ній. Потім розраховується ви-
граш порівняно з вихідною вартістю проведення експерименту.

Сутність застосування методу, схему якого наведена на рисунку 2.3, полягає в такому.

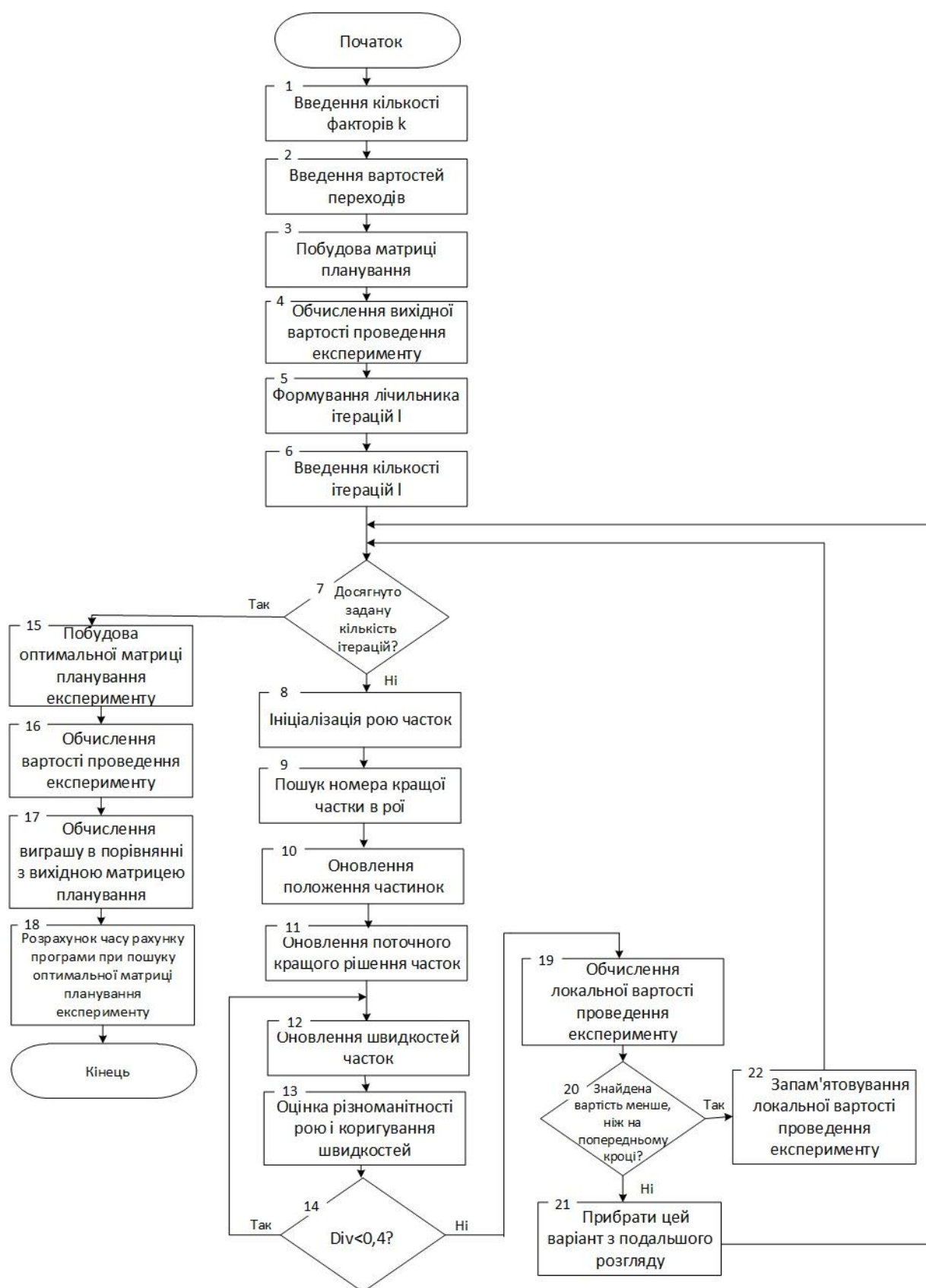


Рисунок 2.3 - Схема реалізації методу оптимізації планів експерименту роєм часток

Крок 1. На початку роботи програми вводиться кількість факторів k .

Крок 2. Уведення вартості переходів між рівнями для кожного з факторів.

Крок 3. Залежно від вибраної кількості факторів відбувається побудова матриці планування експерименту.

Крок 4. Обчислюється вихідна вартість проведення експерименту.

Крок 5. Формуються лічильники ітерацій l .

Крок 6. Здійснюється введення кількості ітерацій l .

Крок 7. Виконується перевірка, чи досягнуто заданої кількості ітерацій чи ні. Якщо досягнуто, то виконується крок 15, в іншому випадку - крок 8.

Крок 8. Зчитуються дані часток. Початкові позиції-перестановки часток ініціалізуються довільно. Для першої позиції вибираємо випадковим чином будь-яку позицію їх значення; для другої позиції - з другої до останньої з подальшою перестановкою їх значень; для третьої позиції здійснюється перестановка значень з випадковою обраною позицією від третьої до останньої і т.д.

Крок 9. Виходячи з аналізу всіх можливих варіантів переходів з початкового стану в локально оптимальний стан (при якому вартість переходу буде мінімальною), записується цей локально оптимальний дослід в оптимізаційну матрицю.

Крок 10. Оновлення положення часток відбувається за допомогою бінарного і тернарного операторів. При використанні бінарного оператора відбувається обчислення відстані між перестановками, де для підрахунку ступеня відмінності між ними знаходиться перша розбіжність при скануванні елементів зліва направо. При використанні тернарного оператора шукається розбіжність з випадково обраною позицією. Якщо елементи цієї позиції збіглися, то проводиться пошук першої розбіжності справа, а в разі невдачі - зліва від неї.

Крок 11. Виконується оновлення поточного кращого рішення часток шляхом запам'ятовування кращого рішення, яке виходить в результаті порівняння значень, знайдених при виконанні кроку 10 і вихідних.

Крок 12. Виконується оновлення швидкостей часток. Різноманітність для i -ї частки визначається як середнє арифметичне ступеня відмінності від знайденого нею локального рішення p_i і глобального рішення рою g , а також відмінністю між цим локальним і глобальним рішенням.

Крок 13. Виконується оцінювання різноманітності рою і коригування швидкостей. Різноманітність рою визначається середньою різноманітністю всіх часток, що входять в нього. Якщо різноманітність в рої стає менше деякого значення, наприклад, як рекомендується в [9] $Div < 0,4$, то відбувається переініціалізація значень швидкостей часток, що дає рою можливість вийти з області тяжіння знайденого локального мінімуму і продовжити подальший пошук глобального рішення. Періодичне оцінювання ступеня різноманітності популяції і відповідне коригування швидкостей часток є своєрідним зворотнім зв'язком, що регулює процес пошуку і дозволяє зробити проведення оптимізації менш чутливим до вибору чисельного значення коефіцієнта w для «гасіння» швидкості.

Крок 14. Виконується перевірка різноманітності рою, тобто $Div < 0,4$ чи ні. Якщо так, то виконується крок 12, в іншому випадку - крок 19.

Крок 15. Після досягнення заданої кількості ітерацій виконується побудова оптимальної матриці планування експерименту (ґрунтується на тому, що якщо на кожному локальному етапі вибирався оптимальний перехід, то і загальний план проведення експерименту буде оптимальним).

Крок 16. Обчислюється загальна вартість реалізації експерименту.

Крок 17. Обчислення величини виграшу B як відносини вихідної вартості проведення експерименту $C_{вих}$, знайденої на кроці 4, до вартості проведення експерименту C_{min} , знайденої на кроці 16.

Крок 18. Обчислюється час t , витрачений на оптимізацію плану багатofакторного експерименту роєм часток.

Крок 19. Обчислення локальної вартості проведення експерименту.

Крок 20. Виконується перевірка чи менша вартість, знайдена на кроці 19, за вартість, обчислену під час попередньої ітерації. Якщо менше, то здійснюється перехід на крок 22, в іншому випадку - на крок 21.

Крок 21. Оскільки ми отримали вартість більше, ніж під час попередньої ітерації, то потрібно виключити цей варіант з розгляду.

Крок 22. Здійснюється запам'ятовування локальної вартості проведення експерименту, а потім виконується перехід на крок 7.

Було розроблено програмне забезпечення, що реалізує метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту роєм часток [10,11]. Мова програмування - Java. Прорахунки виконувалися на комп'ютері з процесором Intel Pentium G620 з частотою 2.60 GHz. Кількість факторів і вартості переходів рівнів факторів вводяться з клавіатури.

Вхідний файл програми має вигляд аналогічний методу синтезу оптимальних планів багатофакторного експерименту табу-пошуком. Вартості переходів користувач вводить з клавіатури.

Реалізація методу рою часток міститься у розробленому модулі `ParticlesSwarming`, який є складовою частиною програми. На рисунку 2.4 показано основні елементи класів `Particles` і `Swarming`.

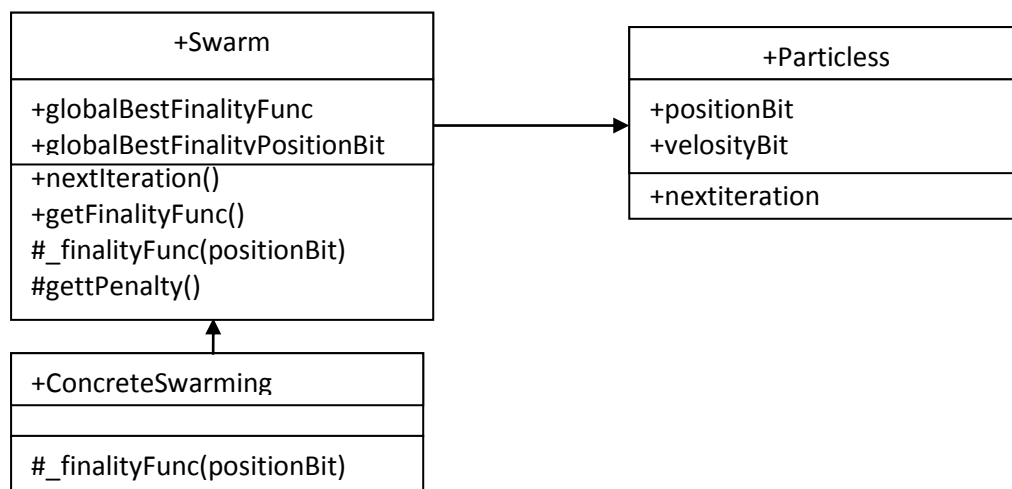


Рисунок 2.4 - Основні елементи класів `Particles` і `Swarming`

Цей пакет містить два класи:

- Particles описує поведінку частинки на кожному кроці ітерації;
- Swarming - це абстрактний базовий клас, в якому необхідно визначити цільову функцію. Саме з класом, що походить від Swarming, працює користувач.

//Ініціалізація класу Swarming, створення потрібної кількості частинок з випадковими значеннями координат і швидкостей

```
def _init_(self,
            swsize,
            minval,
            maxval,
            curVelocityBitRat,
            locVelocityBitRat,
            globVelocityBitRat):
    {swsize - розмір рою (кількість часток)
    minval - список, що задає мінімальні значення для кожної координати
частки
    maxval - список, що задає максимальні значення для кожної координати
частки
    curVelocityBitRat - загальний масштабуючий коефіцієнт для швидкості
    locVelocityBitRat - коефіцієнт, що задає вплив кращої точки,
    знайденої кожною часткою, на майбутню швидкість
    globVelocityBitRat - коефіцієнт, що задає вплив кращої точки,
    знайденої усіма частками, на майбутню швидкість}
from ParticlesSwarming.Swarming import Swarming
class Swarming_X2 (Swarming):
    def _init_(self,
                swsize,
                minval,
                maxval,
                curVelocityBitRat,
                locVelocityBitRat,
                globVelocityBitRat):
        Swarming _ init_ (self,
                            swsize,
                            minval,
```

```

        maxval,
        curVelocityBitRat,
        locVelocityBitRat,
        globVelocityBitRat)
def _FinalityFunc (self, PositionBit):
    penalty = self._getPenalty (PositionBit, 10000.0)
    FinalityFunc = sum (PositionBit * PositionBit)
    return FinalityFunc+penalty.

```

//Перевизначення класу Swarming для конкретної цільової функції

```

class Swarming (object):
    metaclass= ABCMeta
    def __init__ (self,
        swsize,
        minval,
        maxval,
        curVelocityBitRat,
        locVelocityBitRat,
        globVelocityBitRat):
        self._swsize = swsize
        assert len (minval) == len (maxval)
        assert (locVelocityBitRat + globVelocityBitRat)> 4
        self._minval = numpy.array (minval [:])
        self._maxval = numpy.array (maxval [:])
        self._curVelocityBitRat = curVelocityBitRat
        self._locVelocityBitRat = locVelocityBitRat
        self._globVelocityBitRat = globVelocityBitRat
        self._globalBestFinalityFunc = None
        self._globalBestPositionBit = None
        self._Swarming = self._createSwarming ()
    def _createSwarming (self):

```

// Створення рою часток з випадковими координатами і швидкостями

```

        return [Particles (self) for _ in range (self._swsize)]
    def nextIteration (self):
        for Particles in self._Swarming:

```

Particles.nextIteration (self)

//Ініціалізація класу Particles

```
class Particles (object):
    def __init__ (self, Swarming):
        self.__ curPositionBit = self.__ getInitPositionBit (Swarming)
        self.__ locBestPositionBit = self.__ curPositionBit [:]
        self.__ locBestFinalityFunc = Swarming.getFinalityFunc (self.__
curPositionBit)
        self.__ VelocityBit = self.__ getInitVelocityBit (Swarming)
    def __getInitPositionBit (self, Swarming):

        // Повернення списку з випадковими координатами для заданого інтер-
валу змін

        return numpy.random.rand (Swarming.dimension) * (Swarming.maxval -
Swarming.minval) + Swarming.minval
    def __getInitVelocityBit (self, Swarming):

        // Генерування початкової випадкової швидкості

        assert len (Swarming.minval) == len (self.__ curPositionBit)
        assert len (Swarming.maxval) == len (self.__ curPositionBit)
        minval = - (Swarming.maxval - Swarming.minval)
        maxval = (Swarming.maxval - Swarming.minval)
        return numpy.random.rand (Swarming.dimension) * (maxval - minval) +
minval.
```

Тут використовується функція `numpy.random.rand ()`, яка повертає масив заданого розміру з випадкових величин в інтервалі (0, 1).

Конструктор класу `Particles` створює частку з випадковим початковим становищем (`self.__ curPositionBit`), а також з випадковою початковою швидкістю (`self.__ VelocityBit`). Оскільки частка тільки створюється, то її початкове положення приймається за краще за всю історію переміщення частки (змінна `self.__`

locBestPositionBit), і також зберігається краще за всю історію частки значення цільової функції (змінна self.__locBestFinalityFunc).

Цільова функція у нас теж зберігається в класі Swarming (точніше - у похідному від нього класі), тому для її розрахунку викликається процедура getFinalityFunc () класу Swarming. Процедура getFinalityFunc () не тільки розраховує значення цільової функції в переданій точці, а й слідкує, чи не стала ця точно глобально кращою.

```
def getFinalityFunc (self, PositionBit):
    assert len (PositionBit) == len (self.minval)
    FinalityFunc = self._FinalityFunc (PositionBit)
    if (self.__globalBestFinaitylFunc == None or
        FinalityFunc < self.__globalBestFinaitylFunc):
        self.__globalBestFinaitylFunc = FinalityFunc
        self.__globalBestPositionBit = PositionBit [:]
```

Суть алгоритму рою часток знаходиться у nextIteration () із класу Particles.

```
def nextIteration (self, Swarming):
```

// Випадковий вектор для корекції швидкості з урахуванням кращої позиції даної частки

```
    rnd_curBestPositionBit = numpy. random. rand (Swarming.dimension)
```

// Випадковий вектор для корекції швидкості з урахуванням кращої глобальної позиції всіх часток

```
    rnd_globalBestPositionBit = numpy.random.rand (Swarming.dimension)
    veloRatio = Swarming.locVelocityBitRat + Swarming.globVelocityBitRat
    commonRatio = (2.0 * Swarming.curVelocityBitRat /
        (Numpy.abs (2.0 - veloRatio - numpy.sqrt (veloRatio ** 2 - 4.0 *
            veloRatio))))
```

// Прорахунок нової швидкості

```
    newVelocityBit_part1 = commonRatio * self.__ VelocityBit
```

```

newVelocityBit_part2 = (commonRatio *
    Swarming.locVelocityBitRat *
    rnd_curBestPositionBit *
    (Self.__ locBestPositionBit - self.__ curPositionBit))
newVelocityBit_part3 = (commonRatio *
    Swarming.globVelocityBitRat *
    rnd_globalBestPositionBit *
    (Swarming.globalBestPositionBit - self.__ curPositionBit))
self.__ VelocityBit = newVelocityBit_part1 + newVelocityBit_part2 +
newVelocityBit_part3

```

// Оновлення позиції частки

```

self.__ curPositionBit += self.__ VelocityBit
FinalityFunc = Swarming.getFinalityFunc (self.__ curPositionBit)
if FinalityFunc < self.__ locBestFinalityFunc:
    self.__ locBestPositionBit = self.__ curPositionBit[:]
    self.__ locBestFinalityFunc = FinalityFunc.

```

Вихідний файл програми має аналогічний вигляд з методом синтезу оптимальних планів багатofакторного експерименту табу-пошуком. Також було розроблено програмне забезпечення [10] для оптимізації трирівневих планів багатofакторного експерименту [11] для оптимізації композиційних планів другого порядку. Сама суть алгоритму рою часток у них однакова з дворівневими планами, але відрізняються процедурами оброблення вхідних даних через те, що в них присутня різна кількість рівнів факторів.

Резюме до розділу 2

Оскільки задача отримання мінімальної вартості проведення експерименту є NP-важкою, тому точне рішення можливо знайти тільки для невеликої кількості вихідних факторів. У зв'язку з цим актуальне розроблення метаевристичних алгоритмів, таких, як методи синтезу оптимальних за вартісними (часовими)

витратами планів багатофакторного експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування, табу-пошуком, роєм часток. У другому розділі наведено схеми та покроковий опис алгоритмів роботи розроблених методів. Мова програмування розроблених алгоритмів - Java. Прорахунки виконувалися на комп'ютері з процесором Intel Pentium G620 з частотою 2.60 GHz. Кількість факторів і вартості переходів рівнів факторів вводиться з клавіатури користувачем у діалоговому режимі. Метод синтезу оптимальних комбінаторних планів шляхом перестановки стовпців матриці планування досить простий, дозволяє оглянути всю область можливих значень параметрів, але потребує великого обсягу обчислень. Метод побудови оптимальних планів табу-пошуком дозволяє піти від таких недоліків методів локального пошуку, як передчасна збіжність алгоритму і велика залежність кінцевого результату від вибору початкового наближення рішення. При використанні методу оптимізації роєм часток модель, що описує прийняття рішень частками в зграї, є простим і ефективним способом оптимізації, для якої не потрібно знання точного градієнта функції. Положення кожної частки в рої задає можливе рішення оптимізаційного завдання. Рішення про переміщення частки приймає на основі трьох факторів: поточної швидкості, яка вимагає частку продовжити рух і досліджувати нові регіони в області пошуку; знання про власне краще становище і про кращий стан усього рою або найближчої до околиці частки. У цьому випадку кращий стан - це оптимальне значення вартості проведення багатофакторного експерименту. Таким чином, найкращим методом є метод рою часток, оскільки він позбавлений недоліків методів перестановки стовпців матриці планування і табу-пошуку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 2

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 28 с.

2. Adler Y. P., Granovsky, Y. V. Optimal Design of Experiments, Theory and Application. *The Age of Maturity: Fifty Years of Methodology and Applications of Experimental Design in Russia* : Proceedings of the International Conference in Honor of the late Jagdish Srivastava Satellite Conference of the 58th ISI World Statistics Congress (Vienna, Austria, September 25th-30th, 2011). Vienna, Austria, 2011. P. 1- 11.

3. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма случайного поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вып. 70. С.255-262.

4. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатфакторного експерименту з використанням алгоритму випадкового пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63747. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 22.01.2016.

5. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатфакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63466. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 06.01.2016.

6. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатфакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 68265. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

7. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 68266.

Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

8. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма оптимизации ро-ем частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запорожье: ЗНТУ, 2018. Вип. 1 (44). С.41-49.

9. Гальченко В.Я., Якимов А.Н. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации ро-ем частиц: учебное пособие .Черкасы: ФЛП Третьков А. Н., 2015. – 160 с.

10. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатфакторного експерименту з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 71242. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

11. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 71243. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНИХ ЗА ВАТІСНИМИ (ЧАСОВИМИ) ВИТРАТА- МИ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту шляхом перестановки стовпців матриці планування

Перевірка працездатності розробленого методу та програмного забезпечення для оптимізації багатofакторних планів експерименту здійснювалася на ряді практичних завдань, які були вирішені методами аналізу перестановок, випадкового пошуку (перестановки рядків матриці планування) [1].

При дослідженні ваговимірювальної системи для дозування сипких матеріалів ($k = 3$) для вартостей змін значень рівнів факторів, наведених в таблиці 3.1, отримано оптимальний план проведення експерименту, який наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 - Вартості змін значень рівнів факторів

Фактор	Вартості змін, ум.од.			
	з "0" в "+1"	з "0" в "-1"	з "+1" в "-1"	з "-1" в "+1"
X1	10	10	10	10
X2	8	12	24	16
X3	6	4	8	12

Ціна реалізації експерименту за цим планом становить 102 ум.од. як в методі на основі перестановок рядків матриці планування (повний перебір), так і в методі, що базується на перестановці стовпців матриці планування [2]. Однак у методі перестановки стовпців час рахунку програми менше через меншу кількість перестановок, необхідних для отримання результату.

Таблиця 3.2 - Оптимальний план проведенн експерименту

Номер досліджу	Позначення факторів		
	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
6	1	-1	1
5	1	-1	-1
7	1	1	-1
8	1	1	1
4	-1	1	1
3	-1	1	-1

При дослідженні вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$) методом, оснований на випадковій перестановці стовпців матриці планування експерименту [2], для вартостей змін значень рівнів факторів, наведених у таблиці 3.3, отримали план експерименту (таблиця 3.4). План, який отримано за допомогою методу побудови оптимальних за вартісними витратами планів багатфакторного експерименту на основі випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування експерименту) має вартість реалізації 114,25 ум. од., а план, отриманий методом перебору (проаналізовано 7777777 варіантів) - 112,85 ум. од. [1].

Таблиця 3.3 - Вартості змін значень рівнів факторів

Фактор	Вартості змін, ум.од.			
	з "0" в "+1"	з "0" в "-1"	з "+1" в "-1"	з "-1" в "+1"
X1	0,2	0,2	0,2	0,2
X2	0,8	5,65	1,55	4,9
X3	6,65	9,55	7,4	8,8
X4	6,15	8,65	6,9	7,9

Таблиця 3.4 - Плани експерименту для дослідження вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$)

Аналіз перестановок					Випадковий пошук (перестановка стовпців матриці планування)				
Номер досліду	Позначення факторів				Номер досліду	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
0	0	0	0	0		0	0	0	0
8	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	10	1	-1	-1	1
3	-1	-1	1	-1	14	1	1	-1	1
1	-1	-1	-1	-1	16	1	1	1	1
9	1	-1	-1	-1	8	-1	1	1	1
10	1	-1	-1	1	4	-1	-1	1	1
2	-1	-1	-1	1	12	1	-1	1	1
4	-1	-1	1	1	5	-1	1	-1	-1
11	1	-1	1	-1	13	1	-1	1	1
12	1	-1	1	1	2	-1	-1	-1	1
13	1	1	-1	-1	6	-1	1	-1	1
14	1	1	-1	1	9	1	-1	-1	-1
6	-1	1	-1	1	7	-1	1	1	-1
5	-1	1	-1	-1	11	1	-1	1	-1
15	1	1	1	-1	3	-1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	15	1	1	1	-1

Порівняльний аналіз вартостей проведення експерименту, отриманих за допомогою різних методів, показано на рисунку 3.1.

Пошук оптимальних комбінаторних планів експерименту під час дослідження пристрою для контролю якості діелектричних матеріалів (за енергоспоживанням) ($k = 4$) методом, оснований на застосуванні випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування), був реалізований за 10,23 секунди для вартостей змін значень рівнів факторів, наведених у таблиці 3.5.

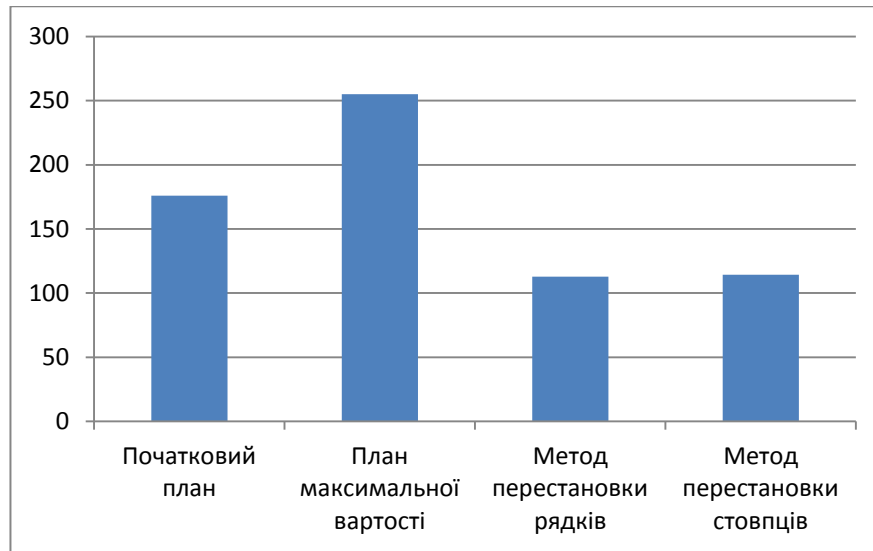


Рисунок 3.1 - Вартості реалізації планів експериментів при дослідженні вихорострумових вимірювачів товщини покриттів

Таблиця 3.5 - Вартості змін значень рівнів факторів

Фактор	Вартості змін, ум.од.			
	з "0" в "+1"	з "0" в "-1"	з "+1" в "-1"	з "-1" в "+1"
X1	3,73	9,43	7,45	18,85
X2	2,23	4,33	4,45	8,65
X3	0,09	0,09	0,18	0,18
X4	0,38	0,58	0,77	1,15

Отримані результати можна порівняти з раніше розробленим методом перестановки рядків матриці планування експерименту, де час рахунку становив 17 секунд. У результаті порівняння швидкодії цих двох методів оптимізації можна зробити висновок, що метод перестановки стовпців матриці планування має більшу швидкодію порівняно з методом перестановки рядків матриці планування через меншу кількість перетворень для отримання кінцевого варіанту. Однак слід пам'ятати, що при збільшенні кількості факторів швидкодія буде зменшуватися.

У результаті оптимізації планів проведення експерименту комплексу технічних систем за допомогою методу, ґрунтованого на використанні випадкового

пошуку (перестановки рядків матриці планування) [2], отримано план експерименту, який має вартість реалізації 1284,65 ум.од. (проаналізовано 50000 варіантів). Вартість реалізації плану, отриманого за допомогою методу, що базується на перестановці стовпців матриці планування, становить 1289,3 ум. од. (проаналізовано 24 варіанти).

Порівняння результатів оптимізації планів експериментів різними методами на ряді практичних задач наведено в таблиці 3.6.

Таким чином, при дослідженні обраних нами об'єктів можна зробити висновки, що метод, який базується на використанні випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування) дає результати, близькі до результатів, отриманих методом випадкового пошуку (перестановки рядків матриці планування), але за менший час завдяки зменшенню необхідних перетворень.

Розроблено метод і програмне забезпечення, що реалізують оптимізацію багатofакторних планів експериментів із застосуванням випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування експерименту). Доведено працездатність і ефективність методу при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем.

Застосування методу, оснований на використанні перестановки стовпців матриці планування експерименту, ефективно при кількості факторів $2 \leq k \leq 6$. Особливо він ефективний при невеликій кількості факторів, оскільки в цьому випадку він дає оптимальний варіант при великій швидкодії.

Недоліком його застосування є те, що при одних і тих же вхідних даних результати оптимізації можуть бути різними. Це пов'язано з тим, що в алгоритмі використовується випадкова генерація склейки стовпців. Тому вихідна матриця може відрізнятися від тієї, що була згенерована при початковому його запуску, що безпосередньо вплине на результат оптимізації.

Таблиця 3.6 - Порівняння результатів оптимізації планів експериментів різними методами на ряді практичних задач

Об'єкт дослідження	Початковий план	План максимальної вартості	Випадковий пошук (перестановка рядків матриці планування)		Випадковий пошук (перестановка стовпців матриці планування)	
			Вартість проведення експерименту	Виграш порівняно з вихідною матрицею	Вартість проведення експерименту	Виграш порівняно з вихідною матрицею
Ваговимірювальна система (k=3)	164	278	102	1,61	102	1,61
Дослідження вихорострумових вимірювачів товщини покриттів (k=4)	204,5	255,3	112,85	1,81	114,25	1,79
Дослідження пристрою для контролю якості діелектричних матеріалів (за енергоспоживанням) (k=4)	30	89,8	30	1	30	1
Обслуговування комплексу технічних систем (k=5 (16 дослідів))	1728,1	2068,38	1284,65	1,35	1289,3	1,34

Незважаючи на недоліки даного алгоритму, його використання буде ефективним, так як при кількості факторів $k \leq 3$ результат буде оптимальним, а при більшій кількості чинників програма видасть результат, наближений до оптимального плану при великій швидкодії.

3.2 Метод оптимізації планів багатфакторних експериментів табу-пошуком

3.2.1 Дослідження дворівневих планів багатфакторного експерименту

Перевірка працездатності розробленого методу побудови та програмного забезпечення [3, 4], оснований на оптимізації табу-пошуком, здійснювалася на ряді практичних завдань, вирішених методами повного перебору і випадкового пошуку (перестановка стовпців матриці планування експерименту).

При дослідженні ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів ($k = 3$) для вартостей змін значень рівнів факторів, наведених у таблиці 3.1, отримано план експерименту методом, заснованим на оптимізації табу-пошуком (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7 - Плани експерименту при дослідженні ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів ($k = 3$)

Аналіз перестановок				Метод табу-пошуку			
Номер досліджу	Позначення факторів			Номер досліджу	Позначення факторів		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3
	0	0	0		0	0	0
1	-1	-1	-1	5	1	-1	-1
2	-1	-1	1	7	1	1	-1
6	1	-1	1	3	-1	-1	1
5	1	-1	-1	4	-1	1	1
7	1	1	-1	8	1	1	1
8	1	1	1	6	1	-1	1
4	-1	1	1	2	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1	-1	-1	-1

Вартість реалізації експерименту дорівнює 110 ум. од. (рисунок 3.2), а для оптимального плану, отриманого при повному переборі рядків, - 102 ум. од. [1].

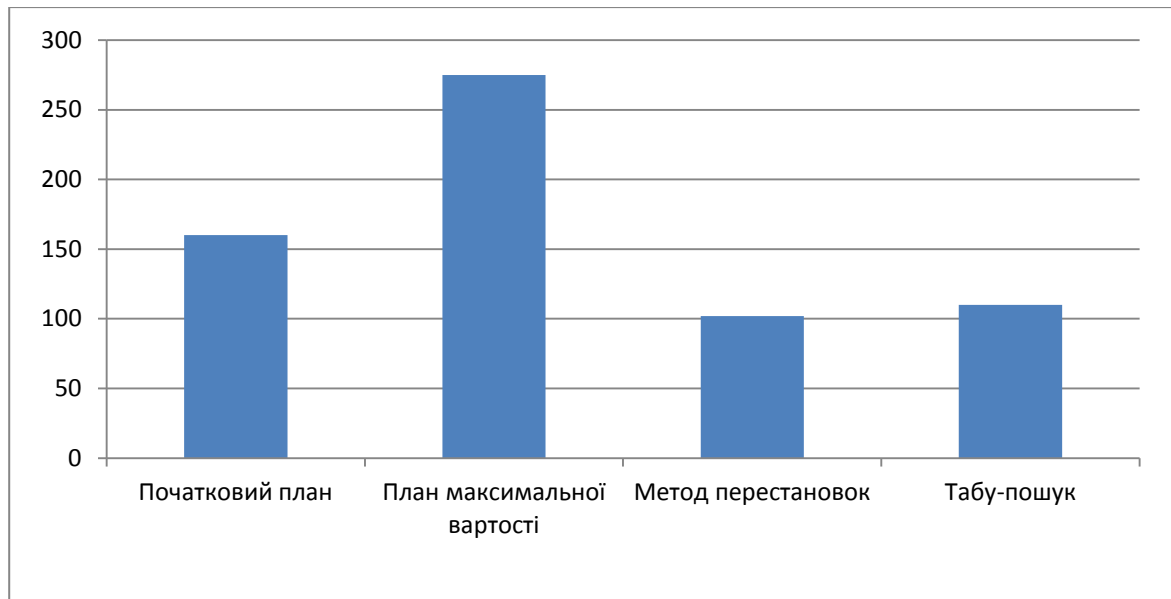


Рисунок 3.2 - Вартості реалізації планів експериментів при дослідженні ваговимірювальної системи

При дослідженні вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$) методом синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, для вартостей змін значень рівнів факторів, наведених у таблиці 3.3, отримано план експерименту (таблиця 3.8).

Таблиця 3.8 - Плани експерименту для дослідження вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$)

Аналіз перестановок					Метод табу-пошуку				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
0	0	0	0	0		0	0	0	0
8	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	5	-1	1	-1	-1

Продовження таблиці 3.8

Аналіз перестановок					Метод табу-пошуку				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
3	-1	-1	1	-1	13	1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	-1	15	1	1	1	-1
9	1	-1	-1	-1	7	-1	1	1	-1
10	1	-1	-1	1	8	-1	1	1	1
2	-1	-1	-1	1	16	1	1	1	1
4	-1	-1	1	1	14	1	1	-1	1
11	1	-1	1	-1	6	-1	1	-1	1
12	1	-1	1	1	10	1	-1	-1	1
13	1	1	-1	-1	2	-1	-1	-1	1
14	1	1	-1	1	4	-1	-1	1	1
6	-1	1	-1	1	12	1	-1	1	1
5	-1	1	-1	-1	11	1	-1	1	-1
15	1	1	1	-1	3	-1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	9	1	-1	-1	-1

Цей план має вартість реалізації 60,1 ум.од. (рисунок 3.3), а план, отриманий методом перебору (проаналізовано 7777777 варіантів) -112,85 ум. од. [1].



Рисунок 3.3 - Вартості реалізації планів експериментів при дослідженні вихорострумових вимірювачів товщини покриттів

При пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту при дослідженні пристрою для контролю якості діелектричних матеріалів (за енергоспоживанням) ($k = 4$) за допомогою метода, оснований на застосуванні табу-пошуку, при вартості змін значень рівнів факторів, наведених у таблиці 3.5, отримано план експерименту (таблиця 3.9), який має меншу вартість, ніж оптимальний план, отриманий методом, що оснований на використанні алгоритму перестановки рядків матриці планування при аналізі 65576 варіантів [1].

Вартість реалізації експерименту за умови використання методу перестановок [1] становить 86,62 ум. од. (рисунок 3.4).

При реалізації плану експерименту, отриманого за допомогою методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, - 53 ум. од.

З огляду на те, що час рахунку табу-пошуком істотно менше, у подальшому порівняння за цим параметром не буде, але зі збільшенням кількості факторів час рахунку табу-пошуком буде збільшуватися.

Таблиця 3.9 - Оптимальні комбінаторні плани багатфакторного експерименту

Аналіз перестановок					Табу-пошук				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	-1	1	1	-1	-1	-	-1
4	1	1	1	1	3	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1	4	-1	-1	1	1
7	-1	-1	1	1	2	-1	-1	-1	1
8	-1	1	1	-1	10	1	-1	-1	1
2	-1	1	-1	-1	9	1	-1	-1	-1
9	1	1	-1	-1	12	1	-1	1	1
1	1	-1	-1	-1	11	1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	15	1	1	1	-1

Продовження таблиці 3.9

Аналіз перестановок					Табу-пошук				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
11	1	-1	1	1	14	1	1	-1	1
12	1	1	1	-1	16	1	1	1	1
13	-1	1	-1	1	13	1	1	-1	-1
14	-1	1	1	1	6	-1	1	-1	1
3	-1	-1	-1	1	8	-1	1	1	1
15	-1	-1	-1	-1	7	-1	1	1	-1
16	-1	-1	1	-1	5	-1	1	-1	-1



Рисунок 3.4 - Порівняння вартостей реалізації планів експериментів, отриманих різними методами оптимізації

Час рахунку програми методом перебору становить 17,85 с, а за допомогою методу табу-пошуку - 0,08 с.

При прорахунку контрольних прикладів ($k \leq 7$) для значення вартостей зміни рівнів факторів, наведених у таблиці 3.10, отримано результати оптимізації планів експерименту за допомогою методів побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами, оснований на використанні повного перебору, випадкового пошуку і табу-пошуку (таблиця 3.11).

Таблиця 3.10 - Вартості змін рівнів факторів

Вартість пере- ходу рівня факто- ра, ум.од.	Кіль- кість факто- рів	Позначення факторів						
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
з «-1» в «+1»	3	1	2	3	-	-	-	-
з «+1» в «-1»		1	3	2	-	-	-	-
з «-1» в «+1»	4	2	2	4	5	-	-	-
з «+1» в «-1»		1	3	3	6	-	-	-
з «-1» в «+1»	5	1	2	3	5	2	-	-
з «+1» в «-1»		1	1	3	6	1	-	-
з «-1» в «+1»	6	2	2	1	3	2	1	-
з «+1» в «-1»		1	4	3	6	1	3	-
з «-1» в «+1»	7	3	1	4	3	2	1	4
з «+1» в «-1»		2	4	3	6	1	3	2

Таблиця 3.11 - Результати оптимізації планів експерименту

Метод пошуку	Кількість факторів k	$C_{\text{вих}}$, ум.од.	C_{min} , ум.од.	B	t, c
Повний перебір	3	26	11	2,36	24,28
Аналіз перестановок	4	116	41	2,83	14400
Випадковий пошук	3	26	11	2,17	1,47
	4	116	66	1,76	5
	5	156	140	1,11	17,44
	6	261	248	1,05	18000
	7	654	647	1,01	86400
Табу-пошук	3	26	14	1,86	0,01
	4	116	42	2,76	0,04
	5	156	76	2,10	0,41
	6	261	181	1,44	4,56
	7	654	512	1,28	45,18

На рисунку 3.5 показано зміни виграшу у вартості реалізації експериментів для кількості факторів $k = 3 \dots 7$ при оптимізації планів експерименту за допо-

могою методів побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами, оснований на використанні повного перебору, випадкового пошуку і табу-пошуку.

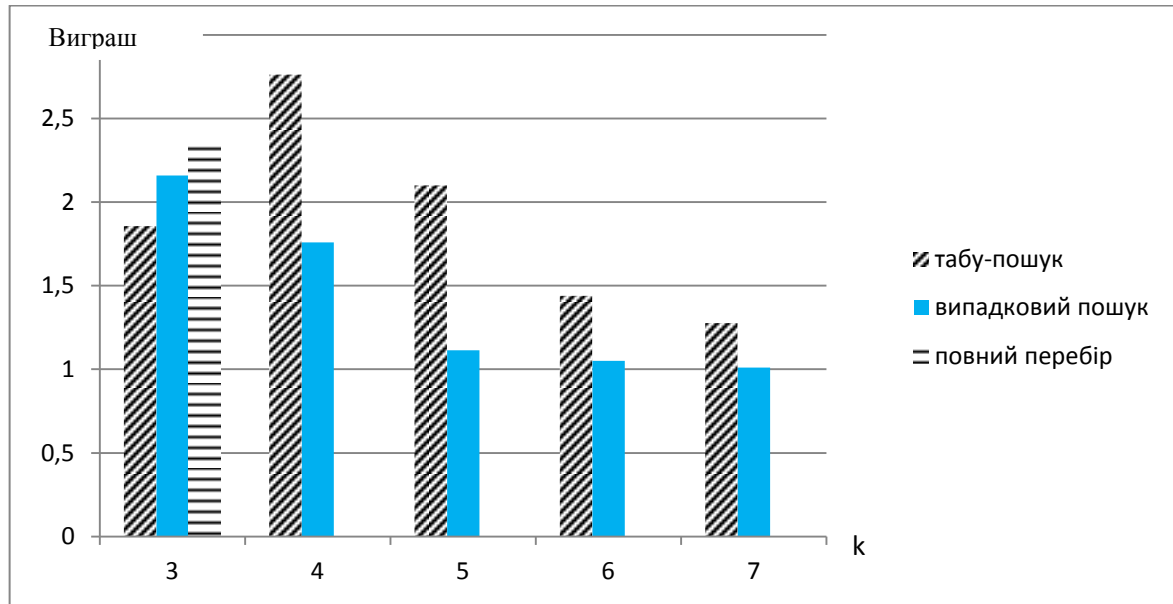


Рисунок 3.5 - Зміна виграшу у вартості реалізації експериментів

Розроблено метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, і відповідне програмне забезпечення. На конкретних прикладах доведено працездатність і ефективність методу. Пошук оптимального або близького до оптимального плану експерименту, отриманого цим методом, реалізується за суттєво менший час рахунку, ніж при повному переборі і методі, заснованому на використанні алгоритму випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування). Застосування розробленого методу та програмного забезпечення ефективно при кількості факторів $k > 3$.

3.2.2 Аналіз результатів оптимізації трирівневих планів багатofакторного експерименту

За допомогою розробленого методу, оснований на використанні табу-пошуку, було проведено оптимізацію вихідного плану експерименту при дослі-

дженні процесу вимірювання щільності струму гальванічних ван мірними датчиками за критерієм сумарної вартості проведення. Було також розроблено програмне забезпечення, що реалізує зазначений вище метод [5]. Вартості змін значень рівнів факторів наведено в таблиці 3.12. Порядок проведення дослідів оптимального за вартістю реалізації плану експерименту наведений в таблиці 3.13.

Таблиця 3.12 - Вартості змін значень рівнів факторів

Вартості змін факторів, ум.од.	Позначення факторів		
	X1	X2	X3
з «0» в «-1»	3	3	3
з «0» в «+1»	2	2	2
з «-1» в «+1»	5	5	5
з «+1» в «-1»	5	5	5
з «-1» в «0»	3	3	3
з «+1» в «0»	2	2	2

Вартість реалізації експерименту за цим планом дорівнює 97 ум. од., тоді як вартість реалізації вихідної матриці планування - 174 ум. од., а максимальна вартість - 225 ум. од. Таким чином, удалося досягти виграшу за вартістю реалізації в 1,79 рази порівняно з вихідним планом проведення експерименту і в 2,32 рази порівняно з планом, що має максимальну вартість [6].

Таблиця 3.13 - Вихідний і оптимальний плани проведення експерименту

Вихідний план				Оптимальний план			
Номер дослідів	Позначення факторів			Номер дослідів	Позначення факторів		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3
1	-1	0	0	1	-1	0	0
2	-1	0	-1	10	+1	+1	+1
3	+1	-1	-1	19	+1	-1	0
4	0	0	+1	20	0	0	0

Продовження таблиці 3.13

Вихідний план				Оптимальний план			
Номер досліджу	Позначення факторів			Номер досліджу	Позначення факторів		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3
5	+1	0	0	11	-1	-1	+1
6	+1	+1	0	12	+1	+1	-1
7	-1	+1	0	21	-1	0	+1
8	-1	+1	+1	24	0	+1	+1
9	+1	0	+1	6	+1	+1	0
10	+1	+1	+1	9	+1	0	+1
11	-1	-1	+1	8	-1	+1	+1
12	+1	+1	-1	17	-1	-1	0
13	0	0	-1	26	+1	0	-1
14	-1	+1	-1	18	0	-1	-1
15	+1	-1	+1	27	0	-1	0
16	0	+1	-1	25	0	+1	0
17	-1	-1	0	22	-1	-1	-1
18	0	-1	-1	14	-1	+1	-1
19	+1	-1	0	23	0	-1	+1
20	0	0	0	15	+1	-1	+1
21	-1	0	+1	13	0	0	-1
22	-1	-1	-1	16	0	+1	-1
23	0	-1	+1	7	-1	+1	0
24	0	+1	+1	4	0	0	+1
25	0	+1	0	5	+1	0	0
26	+1	0	-1	2	-1	0	-1
27	0	-1	0	3	+1	-1	-1

Порівняльна характеристика результатів оптимізації при використанні вдосконаленого програмного забезпечення, що реалізує метод, оснований на використанні табу-пошуку, і раніше розробленої програми для реалізації методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на використанні випадкового пошуку, наведено в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 - Результати оптимізації трирівневих планів експерименту

Метод пошука	$C_{\text{вих.}}$ ум.од.	$C_{\text{min.}}$ ум.од.	$C_{\text{max.}}$ ум.од.	Виграш по відношенню до вихідного плану експе- рименту	Виграш по відношенню до плану, що має макси- мальну вар- тість
Табу-пошук	174	97	225	1,79	2,32
Випадковий пошук	174	147	225	1,2	1,5

У роботі [1] було проведено дослідження шорсткості поверхні кремнію у процесах глибокого плазмохімічного травлення елементів МЕМС. Під час створення плану експерименту було враховано три вхідних фактори процесу, що найбільше впливають на параметр (середнє арифметичне відхилення профілю), що оптимізується: X_1 – відношення тривалостей стадії травлення і пасивації; X_2 - тиск у реакторі, Па; X_3 - температура електрода-підложкотримач, °C.

Умови проведення багатофакторного експерименту представлені в таблиці 3.15. В таблиці 3.16 представлені вартості змін значень рівнів факторів.

Таблиця 3.15 - Умови проведення експерименту

Найменування пара- метрів оптимізації	Позначення	Вхідні фактори		
		X_1	X_2	X_3
Нульовий рівень	0	0,2	3	20
Інтервал варіювання	ΔX_i	0,1	1	10
Нижній рівень	-1	0,1	2	10
Верхній рівень	+1	0,3	4	30

Режими проведення процесів травлення кремнію задавали відповідно до обраного плану (таблиця 3.17), який являє собою повний факторний експеримент для трьох факторів при їх одночасному варіюванні на трьох рівнях: «+1», «-1», «0».

Таблиця 3.16 - Вартості змін значень рівнів факторів при дослідженні режимів проведення процесів травлення кремнію

Вартості змін факторів, ум.од.	Позначення факторів		
	X1	X2	X3
з «0» в «-1»	3	7	8
з «0» в «+1»	2	5	10
з «-1» в «+1»	4	10	20
з «+1» в «-1»	6	14	16
з «-1» в «0»	2	5	10
з «+1» в «0»	3	7	8

Оптимальний план експерименту, який було отримано за допомогою удосконаленого програмного забезпечення, яке реалізує метод табу-пошуку, також наведено у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 - Вихідний і оптимальний плани експерименту

Вихідний план				Оптимальний план			
Номер досліджу	Позначення факторів			Номер досліджу	Позначення факторів		
	X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	0	0	1	-1	0	0
2	-1	0	-1	19	0	0	0
3	+1	-1	-1	10	-1	-1	+1
4	0	0	+1	2	-1	0	-1
5	+1	0	0	11	+1	+1	-1
6	+1	+1	0	3	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	12	0	0	-1
8	+1	0	+1	9	+1	+1	+1
9	+1	+1	+1	24	0	+1	0
10	-1	-1	+1	21	1	-1	-1
11	+1	+1	-1	20	-1	0	+1
12	0	0	-1	23	0	+1	+1
13	-1	+1	-1	14	+1	-1	+1
14	+1	-1	+1	5	+1	0	0

Продовження таблиці 3.17

Вихідний план				Оптимальний план			
Номер досліджу	Позначення факторів			Номер досліджу	Позначення факторів		
	X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃
15	0	+1	-1	17	0	-1	-1
16	-1	-1	0	15	0	+1	-1
17	0	-1	-1	6	+1	+1	0
18	+1	-1	0	8	+1	0	+1
19	0	0	0	26	0	-1	0
20	-1	0	+1	18	+1	-1	0
21	1	-1	-1	27	-1	+1	0
22	0	-1	+1	16	-1	-1	0
23	0	+1	+1	7	-1	+1	+1
24	0	+1	0	25	+1	0	-1
25	+1	0	-1	22	0	-1	+1
26	0	-1	0	13	-1	+1	-1
27	-1	+1	0	4	0	0	+1

Вартість отриманого під час проведення оптимізації план експерименту дорівнює 192 ум. од., тоді як вихідний план - 370 ум. од. Виграш за вартістю проведення експерименту становив 1,92 раза, а у разі використання методу гілок і меж - 1,28 раза. При цьому на проведення оптимізації плану необхідно 0,23 с, в той час як на метод гілок і меж - 137 хв. Таким чином, доведено працездатність методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на використанні табупошуку, на прикладі дослідження шорсткості поверхні кремнію у процесах глибокого плазмохімічного травлення елементів MEMC.

3.2.3 Оптимізація композиційних планів другого порядку

Розроблено метод [7] і програмне забезпечення [8] з використанням табупошуку для оптимізації композиційних планів другого порядку. Як показники

процесу термічних режимів обробки, що впливають на механічні властивості оброблюваного матеріалу, які характеризують поведінку матеріалу під час деформації та руйнування у разі дії зовнішніх навантажень, були обрані модуль пружності Y_1 і міцність матеріалу Y_2 .

Як фактори, які характеризують плин термічного режиму оброблення, були обрані: температура термічного процесу X_1 , час термічної дії X_2 , вологість матеріалу X_3 і пористість матеріалу X_4 .

Вартості і час змін значень рівнів факторів приведено в таблиці 3.18. Вихідний план ортогонального центрального композиційного планування (ОЦКП), відповідно з яким проводили дослідження, дано в таблиці 3.19.

Оптимізацію планів багатофакторного експерименту здійснювали з використанням зазначених нижче критеріїв:

1) сумарна вартість проведення експерименту

$$S_{\text{общ}} = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j} \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де n - кількість дослідів;

k - кількість факторів;

$S_{i,j}$ - вартість установки i -го фактора в j -м досліді;

2) сумарний час проведення експерименту

$$t_{\text{общ}} = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j} \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

де $t_{i,j}$ - час установки i -го фактора в j -м досліді.

Таблиця 3.18 - Вартості і час змін значень рівнів факторів.

Вартості змін рівнів факторів, ум.од.	Позначення фак- торів				Час змін рівнів факто- рів, с	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
з «-α» в «-1»	40	10	2	3	з «-α» в «-1»	720	1	60	60
з «-α» в «0»	140	30	7	2,5	з «-α» в «0»	2520	3	210	60
з «-α» в «+1»	240	50	12	2	з «-α» в «+1»	4320	5	360	60
з «-α» в «+α»	280	58	14	1,8	з «-α» в «+α»	5040	5,8	420	60
з «-1» в «-α»	20	2	6	4,2	з «-1» в «-α»	1440	0,2	120	60
з «-1» в «0»	100	30	5	2,5	з «-1» в «0»	1800	3	150	60
з «-1» в «+1»	200	50	10	2	з «-1» в «+1»	3600	5	300	60
з «-1» в «+α»	240	58	12	1,8	з «-1» в «+α»	4320	5,8	360	60
з «0» в «-α»	70	2	21	4,2	з «0» в «-α»	5040	0,2	420	60
з «0» в «-1»	50	10	15	3	з «0» в «-1»	3600	1	300	60
з «0» в «+1»	100	50	5	2	з «0» в «+1»	1800	5	150	60
з «0» в «+α»	140	58	7	1,8	з «0» в «+α»	2520	5,8	210	60
з «+1» в «-α»	120	2	36	4,2	з «+1» в «-α»	8640	0,2	720	60
з «+1» в «-1»	100	10	30	3	з «+1» в «-1»	7200	1	600	60
з «+1» в «0»	50	30	15	2,5	з «+1» в «0»	3600	3	150	60
з «+1» в «+α»	40	58	2	1,8	з «+1» в «+α»	720	5,8	60	60
з «+α» в «-α»	140	2	42	4,2	з «+α» в «-α»	10080	0,2	840	60
з «+α» в «-1»	120	10	36	3	з «+α» в «-1»	8640	1	720	60
з «+α» в «0»	70	30	21	2,5	з «+α» в «0»	5040	3	420	60
з «+α» в «+1»	20	50	6	2	з «+α» в «+1»	1440	5	120	60

Вартість реалізації експерименту згідно з вихідним планом становить $S_{\text{вих}} = 3025$ ум. од., а час – $t_{\text{вих}} = 97561$ с. За допомогою прикладної програми, що реалізує метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, оптимізуємо вихідний план проведення експерименту за критерієм мінімальної вартості проведення експерименту (формула 3.1). У результаті цього було отримано оптимальний за вартістю реалізації план експерименту, наведений у таблиці 3.19 (оптимальний план 1). Вартість реалізації експерименту за цим планом становить $S_{\text{опт,1}}=551$ ум. од., а час – $t_{\text{опт,1}}=12686$ с. Таким

чином, виграш у вартості реалізації експерименту становить $B_{S1}=5,49$ порівняно з вихідним планом, а в часі – $B_{t1}= 7,69$.

Таблиця 3.19 - Вихідний і оптимальні плани ОЦКП

Вихідний план					Оптимальний план 1					Оптимальний план 2				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1	5	+1	+1	-1	+1
3	+1	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1	8	-1	-1	-1	+1	6	-1	+1	-1	+1
5	+1	+1	-1	+1	7	+1	-1	-1	+1	4	-1	-1	+1	+1
6	-1	+1	-1	+1	5	+1	+1	-1	+1	8	-1	-1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	4	-1	-1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1
8	-1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1	17	$-\alpha$	0	0	0	17	$-\alpha$	0	0	0
10	-1	+1	+1	-1	24	0	0	0	$+\alpha$	23	0	0	0	$-\alpha$
11	+1	-1	+1	-1	23	0	0	0	$-\alpha$	24	0	0	0	$+\alpha$
12	-1	-1	+1	-1	25	0	0	0	0	20	0	$+\alpha$	0	0
13	+1	+1	-1	-1	20	0	$+\alpha$	0	0	11	+1	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	12	-1	-1	+1	-1
15	+1	-1	-1	-1	18	$+\alpha$	0	0	0	15	+1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1	11	+1	-1	+1	-1	16	-1	-1	-1	-1
17	$-\alpha$	0	0	0	12	-1	-1	+1	-1	22	0	0	$+\alpha$	0
18	$+\alpha$	0	0	0	9	+1	+1	+1	-1	21	0	0	$-\alpha$	0
19	0	$-\alpha$	0	0	19	0	$-\alpha$	0	0	25	0	0	0	0
20	0	$+\alpha$	0	0	22	0	0	$+\alpha$	0	19	0	$-\alpha$	0	0
21	0	0	$-\alpha$	0	21	0	0	$-\alpha$	0	18	$+\alpha$	0	0	0
22	0	0	$+\alpha$	0	10	-1	+1	+1	-1	9	+1	+1	+1	-1
23	0	0	0	$-\alpha$	15	+1	-1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1
24	0	0	0	$+\alpha$	16	-1	-1	-1	-1	13	+1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0	13	+1	+1	-1	-1	10	-1	+1	+1	-1

Аналогічно проведемо оптимізацію вихідного плану методом побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного

експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, за критерієм мінімального часу реалізації експерименту (формула 3.2). Отриманий план проведення експерименту наведено в таблиці 3.19 (оптимальний план 2). Час реалізації експерименту за цим планом становить - $t_{\text{опт},2}=7724$ с, а вартість - $S_{\text{опт},2}=730,6$ ум. од. Таким чином, у часі реалізації експерименту виграш становить $B_{t2}=4,14$ порівняно з вихідним планом, а у вартості - $B_{s2}=2,63$.

Порівняння результатів, отриманих за допомогою методів побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на використанні: табу-пошуку, гілок і меж, послідовного приближення при дослідженні термічних режимів обробки пористих матеріалів наведено в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 - Порівняльний аналіз результатів оптимізації

Критерій оптимізації	Метод табу-пошука		Метод гілок і меж		Метод послідовного приближення	
	B_s	B_t	B_s	B_t	B_s	B_t
Формула (1)	5,49	7,69	5,47	7,33	5,47	7,24
Формула (2)	4,14	12,63	3,54	12,58	3,54	12,34

Таким чином, метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, дозволяє отримати виграші більші, ніж при використанні методу гілок і меж або послідовного наближення. Як видно з таблиці 3.20, він дозволяє отримувати більші виграші у вартості й часу реалізації експерименту, ніж інші методи.

Із застосуванням методів планування експериментів виконано оптимізацію плану багатфакторного експерименту при дослідженні процесу обслуговування комплексу технічних систем, які являють собою розподілені ЕОМ, а також режиму роботи оператора з обслуговування цього комплексу. Недоліком цього дослідження є те, що не враховувався час, що витрачається на проведення експерименту [1].

Для дослідження режиму технічного обслуговування комплексу технічних систем параметром оптимізації вибрано чисельне значення Y , що відображує тривалість обслуговування однієї системи. Необхідно знайти умови роботи оператора, за яких простої системи на обслуговування будуть мінімальними. Домінуючими факторами, що впливають на цей показник, були вибрані: X_1 - кількість систем, що обслуговуються оператором протягом робочої зміни; X_2 - середній час обслуговування однієї системи; X_3 - час підготовки до обслуговування чергової системи, хв; X_4 – тривалість робочої зміни, годин. Часові зміни значень рівнів факторів наведено в таблиці 3.21.

Таблиця 3.21 - Часові зміни значень рівнів факторів

Часові зміни значень рівнів факторів, год	Позначення факторів			
	X_1	X_2	X_3	X_4
з «-α» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
з «-α» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
з «-α» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
з «-α» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
з «-1» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
з «-1» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
з «-1» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
з «-1» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
з «0» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
з «0» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
з «0» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
з «0» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
з «+1» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
з «+1» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
з «+1» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
з «+1» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
з «+α» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
з «+α» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
з «+α» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
з «+α» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0

Вихідний план ротабельного центрального композиційного планування (РЦКП), відповідно до якого проводили дослідження, наведено в таблиці 3.22.

Проведемо оптимізацію початкового плану РЦКП за критерієм сумарного часу реалізації експерименту.

Часові витрати на реалізацію експериментів становлять 3604 хвилини для початкового плану; 2134 хвилини для оптимального плану, отриманого методом табу-пошуку. При цьому маємо виграш у часових витратах на реалізацію експерименту в 1,69 раза порівняно з початковим планом, у той час як при використанні методу гілок і меж виграш становив 1,5 раза.

Розроблено метод і програмне забезпечення, що реалізують оптимізацію композиційних планів другого порядку із застосуванням методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку. Доведено працездатність і ефективність методу при дослідженні процесу отримання пористих матеріалів з оптимальними механічними властивостями і при дослідженні процесу обслуговування комплексу технічних систем. Тому для оптимізації планів ОЦКП і РЦКП доцільно використання методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку.

Також з використанням методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, було проведено дослідження режимів роботи оператора радіолокаційної системи (РЛС) [9]. Для визначення оптимальних умов роботи оператора РЛС як критерій оптимізації було розглянуто кількість помилок у оператора. Домінуючими факторами, що впливають на цей показник, були обрані: X_1 – кількість оброблюваних об'єктів на екрані індикатора кругового огляду (ІКО); X_2 – спостережуваність цілей; X_3 – періодичність оновлення інформації на ІКО, с; X_4 – тривалість роботи (цикл) оператора, годин; X_5 – кількість циклів роботи (тренувань) оператора.

Таблиця 3.22 - Вихідний і оптимальні плани ОЦКП

Вихідний план					Оптимальний план (метод гілок і меж)					Оптимальный план (табу-пошук)				
Номер дослід	Позначення факторів				Номер дослід	Позначення факторів				Номер дослід	Позначення факторів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-1	-1	-1	-1	24	0	0	0	+α	1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	11	-1	+1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1	11	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1	23	0	0	0	-α
5	-1	-1	+1	-1	12	+1	+1	-1	+1	18	+α	0	0	0
6	+1	-1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1	22	0	0	+α	0
7	-1	+1	+1	-1	14	+1	-1	+1	+1	25	0	0	0	0
8	+1	+1	+1	-1	13	-1	-1	+1	+1	14	+1	-1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	1	-1	-1	-1	-1	12	+1	+1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1	-1	2	+1	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	7	-1	+1	+1	-1	4	+1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	3	-1	+1	-1	-1	8	+1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	4	+1	+1	-1	-1	6	+1	-1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	8	+1	+1	+1	-1	21	0	0	-α	0
16	+1	+1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1	19	0	-α	0	0
17	-α	0	0	0	2	+1	-1	-1	-1	20	0	+α	0	0
18	+α	0	0	0	17	-α	0	0	0	17	-α	0	0	0
19	0	-α	0	0	18	+α	0	0	0	24	0	0	0	+α
20	0	+α	0	0	19	0	-α	0	0	16	+1	+1	+1	+1
21	0	0	-α	0	20	0	+α	0	0	15	-1	+1	+1	+1
22	0	0	+α	0	21	0	0	-α	0	13	-1	-1	+1	+1
23	0	0	0	-α	22	0	0	+α	0	5	-1	-1	+1	-1
24	0	0	0	+α	25	0	0	0	0	7	-1	+1	+1	-1
25	0	0	0	0	26	0	0	0	0	3	-1	+1	-1	-1
26	0	0	0	0	27	0	0	0	0	26	0	0	0	0
27	0	0	0	0	28	0	0	0	0	27	0	0	0	0
28	0	0	0	0	29	0	0	0	0	28	0	0	0	0
29	0	0	0	0	30	0	0	0	0	29	0	0	0	0
30	0	0	0	0	31	0	0	0	0	30	0	0	0	0
31	0	0	0	0	23	0	0	0	-α	31	0	0	0	0

За допомогою програми, яка реалізує оптимізацію багатфакторних планів експерименту методом табу-пошуку, було синтезовано оптимальний за часовими витратами план РЦКП. Часові витрати на реалізацію експериментів становлять 36977,19 хвилин для початкового плану; 8725,14 хвилин для оптимального плану. При цьому маємо виграш за часовими витратами у 4,24 рази порівняно з початковим планом, тоді як при використанні алгоритму гілок і меж, виграш становив 3,8 рази.

Таким чином, на прикладі дослідження режимів роботи оператора радіолокаційної системи доведено ефективність оптимального за часовими витратами планування експерименту з використанням табу-пошуку порівняно з алгоритмом гілок і меж.

3.3 Метод оптимізації планів багатфакторних експериментів роєм часток

3.3.1 Дослідження дворівневих планів багатфакторного експерименту

Перевірка працездатності розробленого методу та програмного забезпечення, ґрунтованого на оптимізації роєм часток, здійснювалася на ряді практичних завдань (дослідженні ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів ($k = 3$), дослідженні вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$), при пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту ($k = 4$), прорахунки контрольних прикладів з кількістю чинників $k = 3 \dots 7$), вирішених методами повного перебору, табу-пошуку і випадкового пошуку. Кількість факторів і вартості переходів вводяться з клавіатури. Прорахунки виконувалися на комп'ютері з процесором Intel Pentium G620 з частотою 2.60 GHz.

При дослідженні ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів ($k = 3$) розрахунки виконувалися для вартостей змін значень рівнів факторів, наведених в таблиці 3.1. Було отримано результати оптимізації, які відображено в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 - Плани експерименту для дослідження ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів ($k = 3$)

Повний перебір				Метод рою часток			
Номер досліджу	Позначення факторів			Номер досліджу	Позначення факторів		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3
	0	0	0		0	0	0
1	-1	-1	-1	5	1	-1	-1
2	-1	-1	1	7	1	1	-1
6	1	-1	1	3	-1	-1	1
5	1	-1	-1	4	-1	1	1
7	1	1	-1	8	1	1	1
8	1	1	1	6	1	-1	1
4	-1	1	1	2	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1	-1	-1	-1

Вартість реалізації оптимального плану отриманого за допомогою методу рою часток, дорівнює 110 ум. од. (рисунок 3.6) і час рахунку 0,01 с, а для оптимального плану, отриманого при повному переборі рядків - 102 ум. од.[1] і час рахунку 25 с. Зміну вартості реалізації експериментів показано на рисунку 3.6.

При дослідженні ваговимірювальної системи отримана послідовність проведення дослідів (таблиця 3.23), яка дозволяє визначити вартість проведення експерименту трохи більшу, ніж при повному переборі, проте забезпечує більші показники швидкодії.

Для вартостей зміни рівнів факторів при оптимізації плану багатфакторного експерименту з дослідження вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$), наведених в табли-

ці 3.3, отримано результати оптимізації, відображені в таблиці 3.24. Зміну вартостей реалізації експерименту показано на рисунку 3.7.

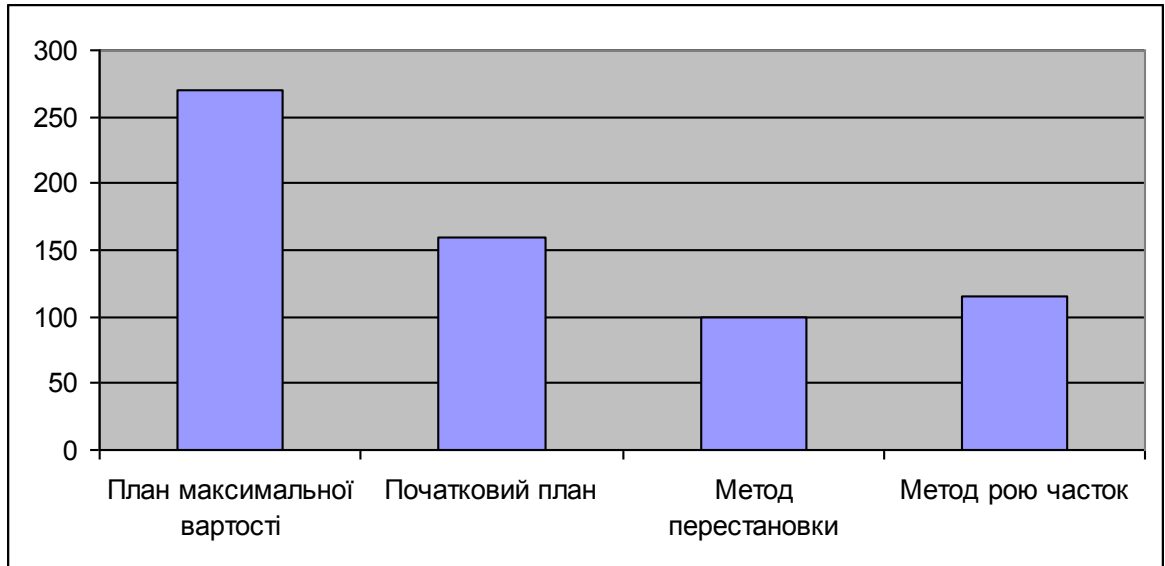


Рисунок 3.6 - Зміна вартості реалізації експериментів при дослідженні ваговиміральної системи

Таблиця 3.24 - Плани експерименту для дослідження вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$)

Аналіз перестановок					Рой часток				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
8	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	5	-1	1	-1	-1
3	-1	-1	1	-1	13	1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	-1	15	1	1	1	-1
9	1	-1	-1	-1	7	-1	1	1	-1
10	1	-1	-1	1	8	-1	1	1	1
2	-1	-1	-1	1	16	1	1	1	1
4	-1	-1	1	1	14	1	1	-1	1
11	1	-1	1	-1	6	-1	1	-1	1
12	1	-1	1	1	10	1	-1	-1	1
13	1	1	-1	-1	2	-1	-1	-1	1

Продовження таблиці 3.24

Аналіз перестановок					Рой часток				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
14	1	1	-1	1	4	-1	-1	1	1
6	-1	1	-1	1	12	1	-1	1	1
5	-1	1	-1	-1	11	1	-1	1	-1
15	1	1	1	-1	3	-1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	9	1	-1	-1	-1

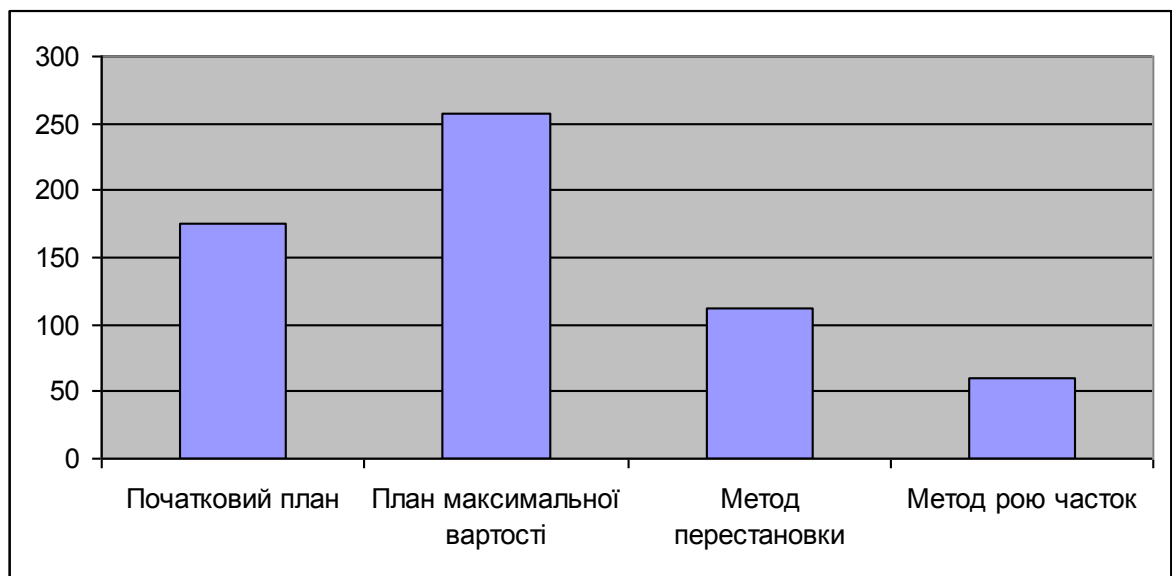


Рисунок 3.7 - Зміна вартості реалізації експериментів при дослідженні вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях

Для вартостей зміни рівнів факторів при пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту ($k = 4$), наведених в таблиці 3.5, отримані результати оптимізації, відображені в таблиці 3.25.

Вартість реалізації експерименту при методі обмеженого перебору [1] становить 86,62 ум. од. При реалізації плану експерименту, отриманого за допомогою методу, що базується на оптимізації роєм часток, - 53 ум. од. Зміну вартостей реалізації експериментів показано на рисунку 3.8.

Таблиця 3.25 - Оптимальні комбінаторні плани багатфакторного експерименту для кількості факторів $k = 4$

Аналіз перестановок (метод обмеженого перебору)					Метод рою часток				
Номер досліду	Позначення факторів				Номер досліду	Обозначение факторов			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
4	1	1	1	1	3	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1	4	-1	-1	1	1
7	-1	-1	1	1	2	-1	-1	-1	1
8	-1	1	1	-1	10	1	-1	-1	1
2	-1	1	-1	-1	9	1	-1	-1	-1
9	1	1	-1	-1	12	1	-1	1	1
1	1	-1	-1	-1	11	1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	15	1	1	1	-1
11	1	-1	1	1	14	1	1	-1	1
12	1	1	1	-1	16	1	1	1	1
13	-1	1	-1	1	13	1	1	-1	-1
14	-1	1	1	1	6	-1	1	-1	1
3	-1	-1	-1	1	8	-1	1	1	1
15	-1	-1	-1	-1	7	-1	1	1	-1
16	-1	-1	1	-1	5	-1	1	-1	-1

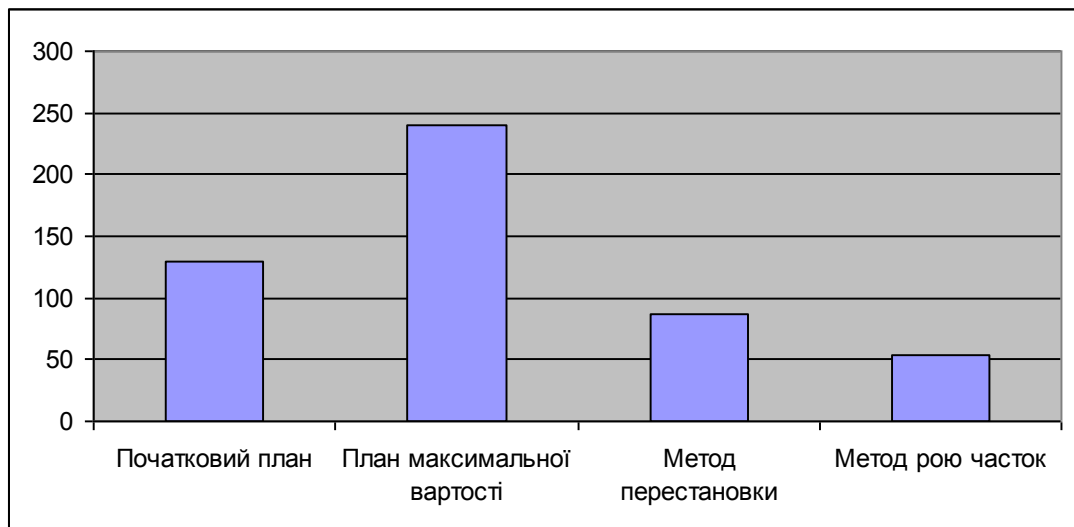


Рисунок 3.8 - Зміна вартості реалізації експериментів при пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту

Як видно з рисунків 3.7 і 3.8, при дослідженні вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$) і при пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту ($k = 4$) удалося знайти такі послідовності дослідів (див. таблиці 3.24, 3.25), при яких вартість проведення експерименту має менше значення, ніж при використанні методу обмеженого перебору.

Для дослідження технологічного процесу калібрування переносних дієлькометричних вологомірів за допомогою методів табу-пошуку, випадкового пошуку (перестановка стовпців матриці планування), рою часток отримано плани проведення експерименту [10], що наведено в таблиці 3.26.

При використанні методів побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту на основі: табу-пошуку, випадкового пошуку, рою часток отримано вартість реалізації експерименту таку ж, як і при методі повного перебору, - 110 ум. од. Початкова вартість повного факторного експерименту дорівнює 120 ум. од. Максимальна вартість має значення 190 ум. од. Виграші у вартості реалізації експерименту становлять 1,1 раза щодо початкового плану і 1,7 раза щодо плану максимальної вартості.

Таблиця 3.26 - Оптимальні плани експерименту при оптимізації технологічного процесу калібрування переносних дієлькометричних вологомірів

Оптимальний план (табу-пошук)			Оптимальний план (перестановка стовпців матриці планування)			Оптимальний план (рій часток)		
Номер дослідів	Фактор		Номер дослідів	Фактор		Номер дослідів	Фактор	
	X_1	X_2		X_1	X_2		X_1	X_2
2	+1	-1	2	+1	-1	2	+1	-1
1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
3	-1	+1	3	-1	+1	3	-1	+1
4	+1	+1	4	+1	+1	4	+1	+1

Порівняльна характеристика вартостей проведення експериментів і виграшів, які були отримані за допомогою різних методів оптимізації наведено в таблиці 3.27.

Таблиця 3.27 - Порівняльна характеристика методів оптимізації, що застосовуються при дослідженні вологоміра

Метод оптимізації	Вартість експерименту, ум. од.	Виграш щодо вихідного плану	Виграш порівняно з планом максимальної вартості
Аналіз перестановок	54	4,65	5,54
Табу-пошук	50	5,02	5,98
Випадковий пошук (перестановки стовпців матриці планування)	56	4,48	5,34
Рой часток	48	5,23	6,23

Виходячи з результатів дослідження процесу калібрування вологомірів, застосування методів, оснований на використанні: табу-пошуку, випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування), рою часток, для об'єктів з кількістю чинників $k = 2$ дає можливість отримати значення вартості проведення експерименту і виграші однакові зі значеннями, отриманими методом повного перебору, що підтверджує їх працездатність.

Оптимальні плани для дослідження приладу вимірювання вологості сипучих матеріалів [11], отримані методами, основаними на використанні: табу-пошуку, випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування), рою часток, наведено в таблиці 3.28. При оптимізації планів експериментів для дослідження приладу вимірювання вологості сипучих матеріалів ($k = 3$)

найбільші виграші за вартістю реалізації експерименту дозволяє отримати метод рою часток.

Таблиця 3.28 - Оптимальні плани експерименту при дослідженні приладу для вимірювання вологості сипучих матеріалів

Оптимальний план (табу-пошук)				Оптимальний план (перестановка стовпців матриці планування)				Оптимальний план (рій часток)			
Номер дослідку	Фактор			Номер дослідку	Фактор			Номер дослідку	Фактор		
	X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	+1	1	-1	-1	+1	1	-1	-1	+1
2	-1	+1	-1	3	+1	-1	-1	3	+1	-1	-1
6	-1	+1	+1	7	+1	-1	+1	7	+1	-1	+1
8	+1	+1	-1	5	-1	-1	-1	5	-1	-1	-1
4	+1	+1	+1	6	-1	+1	+1	6	-1	+1	+1
3	+1	-1	-1	8	+1	+1	-1	2	-1	+1	-1
7	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	4	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1	2	-1	+1	-1	8	+1	+1	-1

При дослідженні процесу вимірювання площі металізації друкованих плат з використанням розроблених методів оптимізації отримано плани проведення експериментів, що наведено в таблиці 3.29.

Вартість виконання експерименту, отримана з використанням метода табу-пошуку, становила 3,63 ум. од. Отримано виграш порівняно з початковим планом у 1,6 раза і 3,27 раза порівняно з планом максимальної вартості. Час рахунку програми - 0,05 с.

Вартість виконання експерименту, отримана за допомогою методу на основі перестановки стовпців матриці планування становила 4,75 ум. од. Отримано виграш порівняно з початковим планом у 1,22 раза і 2,5 раза порівняно з планом максимальної вартості. Час рахунку програми - 13,5 с.

Таблиця 3.29 - Оптимальні плани експерименту для дослідження процесу вимірювання площі металізації друкованих плат

Оптимальний план (табу-пошук)					Оптимальний план (перестановка стовпців матриці планування)					Оптимальний план (рій часток)				
Номер дослід	Фактор				Номер дослід	Фактор				Номер дослід	Фактор			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	4	-1	-1	+1	-1	3	+1	-1	+1	-1
5	+1	+1	-1	-1	5	+1	+1	-1	-1	1	+1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	-1	2	-1	+1	+1	+1	4	-1	-1	+1	-1
6	-1	+1	-1	-1	6	-1	+1	-1	-1	7	+1	-1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	8	-1	-1	-1	+1	5	+1	+1	-1	-1
2	-1	+1	+1	+1	3	+1	-1	+1	-1	8	-1	-1	-1	+1
8	-1	-1	-1	+1	7	+1	-1	-1	+1	6	-1	+1	-1	-1

Вартість виконання експерименту, отримана за допомогою методу рою часток, становила 3,41 ум. од. Отримано вигреш порівняно з початковим планом 1,7 раза і в 3,48 раза порівняно з планом максимальної вартості. Час рахунку програми 0,03 с. Порівняльну характеристику отриманих вартостей проведення експерименту при використанні різних методів оптимізації для дослідження процесу вимірювання площі металізації друкованих плат показано на рисунку 3.9.

При оптимізації планів експериментів під час дослідження процесу вимірювання шорсткості поверхні кремнію в процесах глибокого плазмохімічного травлення елементів МЕМС ($k = 3$) найбільші вигреші за вартістю реалізації експерименту дозволяє отримати метод рою часток ($V=89$ ум. од.). У той час використовуючи метод табу-пошуку, вигреш $V=95$ ум. од, а метод випадкового пошуку - $V=102$ ум.од. Також метод, що базується на використанні рою часток має більші показники швидкодії, тому дозволяє рекомендувати його до використання на практиці для оптимізації виробничих процесів.

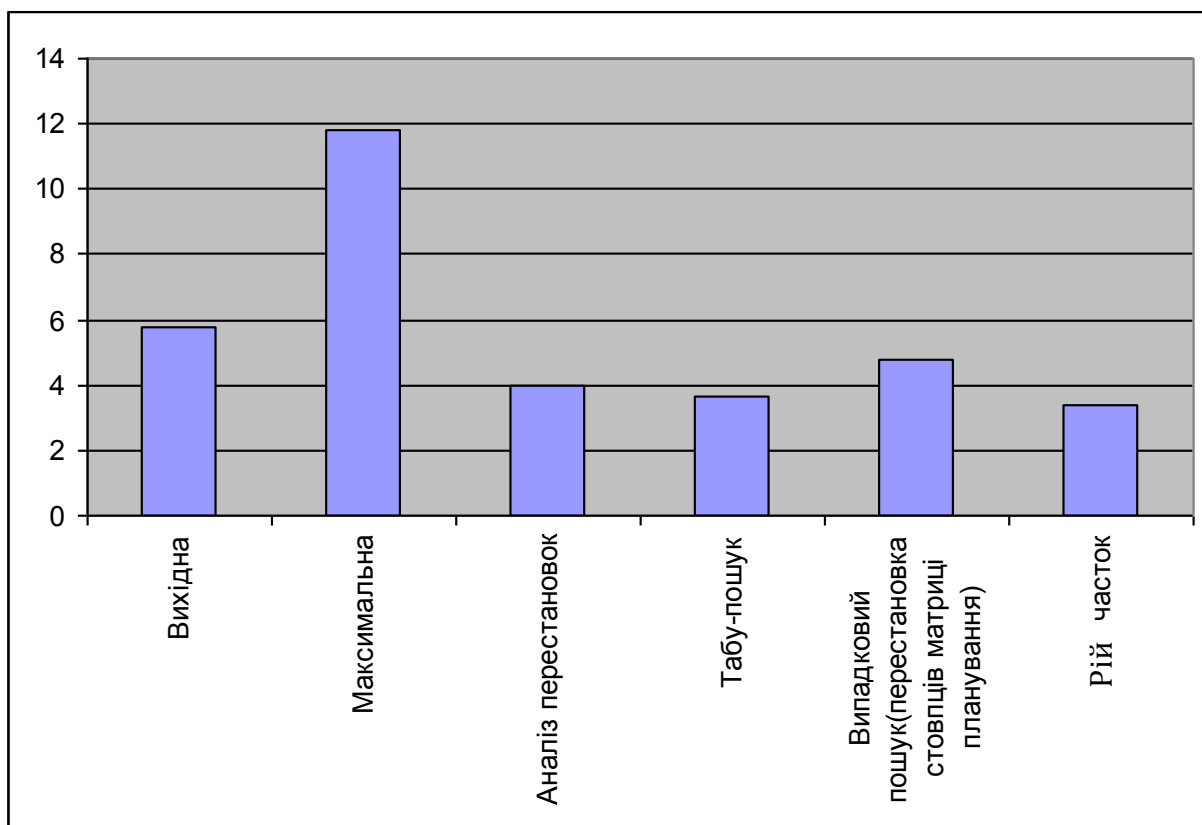


Рисунок 3.9 - Порівняльна характеристика вартостей проведення експерименту при використанні різних методів оптимізації

Вихідні дані для проведення розрахунків: фактори, матриці вартостей зміни рівнів факторів, початковий план експерименту і результати оптимізації початкового плану методами повного перебору або аналізу перестановок (обмежений перебір), або гілок і меж, або серійних послідовностей, або послідовних наближень для таких об'єктів, як технологічних процесів калібрування переносних дієлкометричних вологомірів, приладу для вимірювання вологості сипучих матеріалів і процесу вимірювання площі металізації друкованих плат наведено в монографії [1].

Для вартостей зміни рівнів факторів, наведених в таблиці 3.10, під час прорахунку контрольних прикладів отримано результати оптимізації, відображені в табл.3.30. Зміну виграшу у вартості реалізації експериментів показано на рисунку 3.10.

Таблиця 3.30 - Результати оптимізації планів експерименту

Метод пошуку	Кількість факторів k	$C_{вих}$, ум. од.	C_{min} , ум.од.	B	t , с
Повний перебір	3	26	11	2,36	24,28
Випадковий пошук	3	26	12	2,17	1,47
	4	116	66	1,76	5
	5	156	140	1,11	17,44
	6	261	248	1,05	18000
	7	654	647	1,01	86400
Табу-пошук	3	26	14	1,86	0,01
	4	116	42	2,76	0,04
	5	156	76	2,10	0,41
	6	261	181	1,44	4,56
	7	654	512	1,28	45,18
Метод оптимізації роєм часток	3	26	11	2,36	0,01
	4	116	41	2,83	0,02
	5	156	68	2,29	0,1
	6	261	153	1,71	1,2
	7	654	482	1,36	15

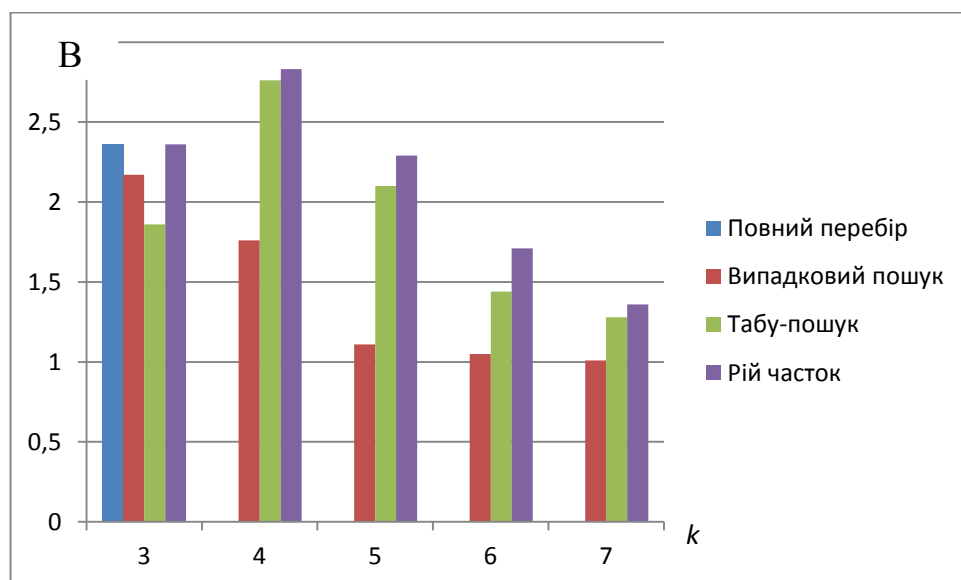


Рисунок 3.10 - Зміна виграшу у вартості реалізації експериментів

Розроблена програма дозволяє знайти мінімальну вартість проведення повного факторного експерименту (ПФЕ), послідовність реалізації дослідів, виграш порівняно з вихідною матрицею планування і час рахунку.

Під час прорахунку контрольних прикладів для значення вартостей зміни рівнів факторів, наведених у таблиці 3.10, отримано результати оптимізації планів експерименту за допомогою методів, що базуються на використанні: повного перебору, випадкового пошуку, табу-пошуку, рою часток (таблиця 3.30).

Як видно з таблиці 3.30, виграші в результатах оптимізації при використанні методу рою часток отримані більші, ніж при методах на основі алгоритмів табу-пошуку і випадкового пошуку, і однакові з повним перебором. Однак, як видно з рисунка 3.10, на якому показано зміни виграшу у вартості реалізації експериментів для кількості факторів $k = 3 \dots 7$ при оптимізації планів експерименту за допомогою методів: повного перебору, випадкового пошуку, табу-пошуку і рою часток при збільшенні кількості факторів виграші в вартості реалізації експерименту зменшуються.

Як видно з таблиці 3.30, час рахунку необхідний для отримання кінцевого результату при застосуванні методу, що базується на використанні рою часток, значно менший, ніж при використанні методів повного перебору, випадкового пошуку.

Час рахунку розробленої програми не надто відрізняється від програми, що реалізує табу-пошук, однак дозволяє отримувати більші виграші.

3.3.2 Аналіз результатів оптимізації трирівневих планів багатфакторного експерименту

Проводили оптимізацію плану багатфакторного експерименту з використанням розробленого програмного продукту [12] для дослідження способу вимірювання щільності струму гальванічних ванн із мірними датчиками.

Вихідний план експерименту виду 3^k , а також сам опис методу вимірювання дано в роботі [1].

За допомогою методу рою часток було проведено оптимізацію вихідного плану експерименту за критерієм сумарної вартості реалізації. Вартості змін рівнів факторів наведено в таблиці 3.12.

В оптимальному за вартістю реалізації плані експерименту послідовність проведення дослідів наведено в таблиці 3.31. Вартість його реалізації має значення 85 ум. од., а вартість реалізації вихідної матриці планування становить 174 ум. од., тоді як максимальна вартість – 225 ум. од. Так вдалося досягти виграшу за вартістю реалізації в 2,05 раза порівняно з вихідним планом експерименту, в 2,64 раза порівняно з планом максимальної вартості. Порівняльні результати від використання рою часток і раніше розробленої програми наведено в таблиці 3.32 [13].

З використанням розробленого програмного забезпечення [12] оптимізували план багатофакторного експерименту при визначенні шорсткості поверхні кремнію у процесах глибокого плазмохімічного травлення елементів МЕМС. Умови проведення експерименту наведено в таблиці 3.15. У таблиці 3.16 наведено вартості змін значень рівнів факторів.

Таблиця 3.31 - Вихідний і оптимальний(рій часток) плани експерименту

Вихідний план				Оптимальний план (рій часток)			
Номер дослідів	Позначення факторів			Номер дослідів	Позначення факторів		
	X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3
1	-1	0	0	1	-1	0	0
2	-1	0	-1	10	+1	+1	+1
3	+1	-1	-1	19	+1	-1	0
4	0	0	+1	20	0	0	0
5	+1	0	0	2	-1	0	-1
6	+1	+1	0	3	+1	-1	-1
7	-1	+1	0	21	-1	0	+1

Продовження таблиці 3.31

Вихідний план				Оптимальний план (рій часток)			
Номер досліджу	Позначення факторів			Номер досліджу	Позначення факторів		
	X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃
8	-1	+1	+1	24	0	+1	+1
9	+1	0	+1	6	+1	+1	0
10	+1	+1	+1	4	0	0	+1
11	-1	-1	+1	22	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	13	0	0	-1
13	0	0	-1	14	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	23	0	-1	+1
15	+1	-1	+1	5	+1	0	0
16	0	+1	-1	15	+1	-1	+1
17	-1	-1	0	12	+1	+1	-1
18	0	-1	-1	11	-1	-1	+1
19	+1	-1	0	17	-1	-1	0
20	0	0	0	26	+1	0	-1
21	-1	0	+1	8	-1	+1	+1
22	-1	-1	-1	9	+1	0	+1
23	0	-1	+1	27	0	-1	0
24	0	+1	+1	18	0	-1	-1
25	0	+1	0	16	0	+1	-1

Таблиця 3.32 - Результати оптимізації планів експерименту

Метод пошуку	Вихідна вартість C _{вих.} , ум.од.	Мінімальна вартість C _{min.} , ум.од.	Максимальна вартість C _{max.} , ум.од.	Виграш порівняно з вихідним планом експерименту	Виграш порівняно з планом, що має максимальну вартість
Метод оптимізації роєм часток	174	85	225	2,05	2,64
Табу-пошук	174	97	225	1,79	2,32
Випадковий пошук	174	147	225	1,2	1,5

Згідно з обраним планом (таблиця 3.33), який являє собою повний факторний експеримент з трьох факторів при одночасному варіюванні їх на трьох рівнях: «+1», «-1», «0», задавали режими проведення процесу травлення кремнію.

Таблиця 3.33 - Вихідний і оптимальний (рій часток) плани експерименту при дослідженні процесу травлення кремнію

Вихідний план				Оптимальний план (рій часток)			
Номер досліду	Позначення факторів			Номер досліду	Позначення факторів		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3
1	-1	0	0	1	-1	0	0
2	-1	0	-1	19	0	0	0
3	+1	-1	-1	10	-1	-1	+1
4	0	0	+1	22	0	-1	+1
5	+1	0	0	7	-1	+1	+1
6	+1	+1	0	4	0	0	+1
7	-1	+1	+1	13	-1	+1	-1
8	+1	0	+1	25	+1	0	-1
9	+1	+1	+1	16	-1	-1	0
10	-1	-1	+1	26	0	-1	0
11	+1	+1	-1	2	-1	0	-1
12	0	0	-1	20	-1	0	+1
13	-1	+1	-1	23	0	+1	+1
14	+1	-1	+1	5	+1	0	0
15	0	+1	-1	15	0	+1	-1
16	-1	-1	0	6	+1	+1	0
17	0	-1	-1	18	+1	-1	0
18	+1	-1	0	3	+1	-1	-1
19	0	0	0	27	-1	+1	0
20	-1	0	+1	9	+1	+1	+1
21	1	-1	-1	17	0	-1	-1
22	0	-1	+1	8	+1	0	+1
23	0	+1	+1	11	+1	+1	-1

Продовження таблиці 3.33

Вихідний план				Оптимальний план (рій часток)			
Номер досліду	Позначення факторів			Номер до- сліду	Позначення факторів		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3
24	0	+1	0	14	+1	-1	+1
25	+1	0	-1	12	0	0	-1
26	0	-1	0	21	1	-1	-1
27	-1	+1	0	24	0	+1	0

Оптимальний план експерименту, який було отримано за допомогою розробленого програмного забезпечення, що реалізує метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту, що базується на використанні рою часток, також наведено у таблиці 3.33. Оптимізований план експерименту має вартість реалізації 142 ум. од., а вихідний план - 370 ум. од. Виграш за вартістю проведення експерименту становить 2,61 раза, в при застосуванні методу гілок і меж виграш мав значення 1,28 раза. За умови використання методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту роєм часток на оптимізацію плану необхідно витратити 0,33 с, а на реалізацію методом гілок і меж - 137 хв [14].

Було доведено працездатність розробленого методу побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту роєм часток при дослідженні шорсткості поверхні кремнію у процесах глибокого плазмохімічного травління елементів МЕМС, а також метода вимірювання щільності струму гальванічних ванн із застосуванням мірних датчиків.

Таким чином, на конкретних прикладах доведено працездатність і ефективність методу, і програмного забезпечення, що реалізують оптимізацію із використанням рою часток планів багатфакторного експерименту з варіюванням факторів на трьох рівнях.

Пошук оптимального або близького до оптимального плану експерименту, отриманого цим методом, реалізується за суттєво менший час рахунку, ніж при методах побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатфакторного експерименту на основі методів гілок і меж та випадкового пошуку. Виграш у вартості реалізації планів експериментів при використанні цього методу значно більше, ніж при методах випадкового пошуку і табу-пошуку. Застосування розробленого програмного забезпечення, оснований на використанні рою часток, ефективно при кількості факторів $k \geq 3$.

3.3.3 Оптимізація композиційних планів другого порядку

Були створені метод і програма [15, 17], що застосовуються для оптимізації композиційних планів другого порядку із застосуванням рою часток. Вартісні і часові зміни значень рівнів факторів впливу різних характеристик термічного режиму обробки на механічні властивості оброблюваного матеріалу [16] наведено в таблиці 3.18. Вартість вихідного плану реалізації експерименту має значення $S_{\text{вих}}=3025$ ум. од., а час – $t_{\text{вих}}=97561$ с.

Вихідний план ортогонального центрального композиційного планування (ОЦКП), згідно з яким проводили дослідження, наведено в таблиці 3.34.

Таблиця 3.34 - Вихідний і оптимальні плани ОЦКП

Вихідний план					Оптимальний план 1					Оптимальний план 2				
Но мер дос- ліду	Позначення факторів				Но- мер дос- ліду	Позначення факторів				Но- мер дос- ліду	Позначення факторів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1	5	+1	+1	-1	+1
3	+1	-1	+1	+1	4	-1	-1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1

Продовження таблиці 3.34

Вихідний план					Оптимальний план 1					Оптимальний план 2				
Но мер дос- ліду	Позначення факторів				Но- мер дос- ліду	Позначення факторів				Но- мер дос- ліду	Позначення факторів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
4	-1	-1	+1	+1	17	- α	0	0	0	6	-1	+1	-1	+1
5	+1	+1	-1	+1	25	0	0	0	0	17	- α	0	0	0
6	-1	+1	-1	+1	22	0	0	+ α	0	3	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	-1	+1	21	0	0	- α	0	4	-1	-1	+1	+1
8	-1	-1	-1	+1	20	0	+ α	0	0	8	-1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	7	+1	-1	-1	+1
10	-1	+1	+1	-1	12	-1	-1	+1	-1	22	0	0	+ α	0
11	+1	-1	+1	-1	15	+1	-1	-1	-1	12	-1	-1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1	7	+1	-1	-1	+1	10	-1	+1	+1	-1
13	+1	+1	-1	-1	8	-1	-1	-1	+1	9	+1	+1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	21	0	0	- α	0
15	+1	-1	-1	-1	18	+ α	0	0	0	19	0	- α	0	0
16	-1	-1	-1	-1	10	-1	+1	+1	-1	24	0	0	0	+ α
17	- α	0	0	0	9	+1	+1	+1	-1	23	0	0	0	- α
18	+ α	0	0	0	16	-1	-1	-1	-1	25	0	0	0	0
19	0	- α	0	0	13	+1	+1	-1	-1	20	0	+ α	0	0
20	0	+ α	0	0	24	0	0	0	+ α	11	+1	-1	+1	-1
21	0	0	- α	0	23	0	0	0	- α	15	+1	-1	-1	-1
22	0	0	+ α	0	19	0	- α	0	0	16	-1	-1	-1	-1
23	0	0	0	- α	5	+1	+1	-1	+1	18	+ α	0	0	0
24	0	0	0	+ α	6	-1	+1	-1	+1	14	-1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0	2	-1	+1	+1	+1	13	+1	+1	-1	-1

Оптимізацію планів багатфакторного експерименту здійснювали із застосуванням таких критеріїв: вартості проведення експерименту, часу проведення експерименту.

За допомогою прикладної програми, що реалізує метод рою часток, оптимізуємо вихідний план проведення експерименту за критерієм мінімальної вартості проведення експерименту (формула 3.1).

У результаті цього було отримано оптимальний план експерименту, наведений у таблиці 3.34. Вартість реалізації експерименту за цим планом становить $S_{\text{опт},1}=511$ ум. од., а час – $t_{\text{опт},1}=11820$ с. Таким чином, виграш у вартості реалізації експерименту становить $B_{S1}=5,92$ раза порівняно з вихідним планом, а в часі – $B_{t1}=8,25$ раза [17].

Аналогічно проведемо оптимізацію вихідного плану методом побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту на основі рою часток за критерієм мінімального часу реалізації експерименту (формула 3.2).

Отриманий план проведення експерименту наведено в таблиці 3.34. Час реалізації експерименту за цим планом становить - $t_{\text{опт},2}=7225$ с, а вартість - $S_{\text{опт},2}=698,6$ ум. од. Таким чином, виграші в часі реалізації експерименту становлять $B_{t2}= 4,33$ раза порівняно з вихідним планом, а у вартості - $B_{S2}=13,5$ раза.

Порівняння результатів, отриманих методами побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного роєм часток, табу-пошуку, гілок і меж, проб і помилок, наведено в таблиці 3.35.

Таким чином, метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту на основі оптимізації роєм часток дозволяє отримати виграші більші, ніж при використанні таких методів: гілок і меж, послідовного наближення, табу-пошуку. Однак він має набагато нижчі показники (час вирішення 0,42 с) швидкодії порівняно з методом гілок і меж (час вирішення близько до 0 с).

Таким чином, метод рою часток потребує трохи більшого обсягу пам'яті ЕОМ і має трохи більший час вирішення завдання порівняно з методом послідовного наближення. Однак, як видно з таблиці 3.35, метод рою часток дозволяє отримувати більші виграші у вартості і часу реалізації експерименту.

Таблиця 3.35 - Порівняльний аналіз результатів оптимізації

Виграші	Метод рою часток		Метод табу-пошуку		Метод гілок і меж		Метод послідовного наближення	
	B_s	B_t	B_s	B_t	B_s	B_t	B_s	B_t
За вартістю реалізації експерименту	5,92	8,25	5,49	7,69	5,47	7,33	5,47	7,24
За часом реалізації експерименту	4,33	13,5	4,14	12,63	3,54	12,58	3,54	12,34

Для дослідження режиму обслуговування комплексу технічних систем параметром оптимізації існує чисельне значення Y , що відображує тривалість обслуговування однієї системи. Необхідно знайти умови роботи оператора, в яких простої системи обслуговування будуть мінімальними. Часові зміни значень рівнів факторів наведено в таблиці 3.21.

Вихідний план ротатабельного центрального композиційного планування (РЦКП), відповідно до якого проводили дослідження, наведено в таблиці 3.36.

Таблиця 3.36 - Вихідний і оптимальні плани РЦКП

Вихідний план					Оптимальний план (метод гілок і меж)					Оптимальний план (рій часток)				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	-1	-1	24	0	0	0	$+\alpha$	1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	11	-1	+1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1	11	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1	23	0	0	0	$-\alpha$
5	-1	-1	+1	-1	12	+1	+1	-1	+1	18	$+\alpha$	0	0	0
6	+1	-1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1	22	0	0	$+\alpha$	0
7	-1	+1	+1	-1	14	+1	-1	+1	+1	25	0	0	0	0
8	+1	+1	+1	-1	13	-1	-1	+1	+1	14	+1	-1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1

Продовження таблиці 3.36

Вихідний план					Оптимальний план (метод гілок і меж)					Оптимальний план (рій часток)				
Номер дослідів	Позначення факторів				Номер дослідів	Позначення факторів				Номер дослідів	Позначення факторів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
10	+1	-1	-1	+1	1	-1	-1	-1	-1	12	+1	+1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1	-1	2	+1	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	7	-1	+1	+1	-1	4	+1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	3	-1	+1	-1	-1	8	+1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	4	+1	+1	-1	-1	6	+1	-1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	8	+1	+1	+1	-1	21	0	0	- α	0
16	+1	+1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1	19	0	- α	0	0
17	- α	0	0	0	2	+1	-1	-1	-1	20	0	+ α	0	0
18	+ α	0	0	0	17	- α	0	0	0	17	- α	0	0	0
19	0	- α	0	0	18	+ α	0	0	0	16	+1	+1	+1	+1
20	0	+ α	0	0	19	0	- α	0	0	15	-1	+1	+1	+1
21	0	0	- α	0	20	0	+ α	0	0	13	-1	-1	+1	+1
22	0	0	+ α	0	21	0	0	- α	0	5	-1	-1	+1	-1
23	0	0	0	- α	22	0	0	+ α	0	7	-1	+1	+1	-1
24	0	0	0	+ α	25	0	0	0	0	3	-1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0	26	0	0	0	0	26	0	0	0	0
26	0	0	0	0	27	0	0	0	0	27	0	0	0	0
27	0	0	0	0	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
28	0	0	0	0	29	0	0	0	0	29	0	0	0	0
29	0	0	0	0	30	0	0	0	0	30	0	0	0	0
30	0	0	0	0	31	0	0	0	0	31	0	0	0	0
31	0	0	0	0	23	0	0	0	- α	24	0	0	0	+ α

Проведемо оптимізацію початкового плану РЦКП за критерієм сумарного часу реалізації експерименту. Часові витрати на реалізацію експериментів становить 3604 хвилини для початкового плану; 1996 хвилин - для оптимального плану, отриманого методом рою часток. При цьому маємо виграв у часових витратах на реалізацію експерименту в 1,81 раза порівняно з початковим

планом. У той час, як і при використуванні методів гілок і меж, виграш становив 1,5 раз, а алгоритму табу-пошуку - 1,69 раз.

Розроблено метод, що реалізує оптимізацію композиційних планів другого порядку роєм часток. Доведено його працездатність і ефективність при оптимізації планів багатфакторного експерименту процесу отримання пористих матеріалів з оптимальними механічними властивостями і процесу обслуговування комплексу технічних систем.

Високопродуктивна, економічна та безпечна робота окремих приладів і пристроїв потребує застосування сучасних методів і засобів вимірювання параметрів, які характеризують хід виробничого процесу, а також стан обладнання.

Одним з найважливіших параметрів технологічних процесів є температура. Вона має деякі найважливіші особливості, що зумовлює необхідність використання великої кількості методів і технічних засобів для її точного вимірювання. Також необхідно забезпечити можливість її регулювання при виготовленні різних приладів, деталей для підтримки заданих температурних режимів, які закладені в рамках технологічного процесу.

При дослідженні напівпровідникового терморегулятора [18] в якості незалежних змінних, які впливають на його роботу, взято такі узагальнені параметри: X_1 - напруга живлення вимірювального моста U_m , В; X_2 - напруга живлення терморегулятора U_n , В; X_3 - температура повітряного середовища у зоні датчика температури T , ° С; X_4 - опір навантаження терморегулятора R_n , Ом. Як параметр оптимізації було вибрано напругу на виході терморегулятора $U_{вих}$, В.

Вартості змін значень рівнів факторів при дослідженні напівпровідникового терморегулятора [19] наведено в таблиці 3.37, а матриця планування експерименту - в таблиці 3.38.

Для вартостей зміни рівнів факторів при дослідженні напівпровідникового терморегулятора, наведених у таблиці 3.37, отримано результати оптимізації, що відображено в таблиці 3.39 [13].

Таблиця 3.37 - Вартості змін значень рівнів факторів

Вартості змін значень рівнів факторів	Позначення факторів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
з «-1» в «+1», ум.од.	2,0	2,4	60,0	1,6
з «+1» в «-1», ум.од.	2,4	2,8	30,0	2,0
з «0» в «-1», ум.од.	1,2	1,4	15,0	1,0
з «0» в «+1», ум.од.	1,0	1,2	30,0	0,8

Таблиця 3.38 - Матриця планування початкового експерименту

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

Таблиця 3.39 - Вихідний і оптимальні плани ПФЕ при дослідженні терморегулятора

Вихідний план					Табу-пошук					Випадковий пошук (перестановка стовпців матриці планування)					Рой часток				
Но- мер до- слі- ду	Позначення фак- торів				Но- мер до- слі- ду	Позначення фак- торів				Но- мер до- слі- ду	Позначення фак- торів				Но- мер дос- ліду	Позначення фак- торів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	9	-1	-1	-1	+1	6	+1	-1	+1	-1	13	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	11	-1	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1	-1	8	+1	+1	+1	-1
4	+1	+1	-1	-1	3	-1	+1	-1	-1	10	+1	-1	-1	+1	15	-1	+1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	4	+1	+1	-1	-1	14	+1	-1	+1	+1	3	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	12	+1	+1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1	7	-1	+1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1	16	+1	+1	+1	+1	2	+1	-1	-1	-1	11	-1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	15	-1	+1	+1	+1	8	+1	+1	+1	-1	16	+1	+1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	8	+1	+1	+1	-1	16	+1	+1	+1	+1	12	+1	+1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	7	-1	+1	+1	-1	4	+1	+1	-1	-1	4	+1	+1	-1	-1
11	-1	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1	-1	3	-1	+1	-1	-1	14	+1	-1	+1	+1
12	+1	+1	-1	+1	13	-1	-1	+1	+1	11	-1	+1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1	14	+1	-1	+1	+1	12	+1	+1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1
14	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	+1	-1	15	-1	+1	+1	+1	5	-1	-1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	2	+1	-1	-1	-1	7	-1	+1	+1	-1	6	+1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	10	+1	-1	-1	+1	13	-1	-1	+1	+1	2	+1	-1	-1	-1

Порівняльну характеристику запропонованих методів при дослідженні напівпровідникового терморегулятора наведено в таблиці 3.40. При цьому початкова вартість проведення експерименту дорівнює 202,4 ум. од., а максимальна - 611,6 ум. од. [20].

Оскільки математична модель виявилася неадекватною [1], було прийнято рішення добудувати план ПФЕ до плану рототабельного центрального композиційного планування (РЦКП). Вартості змін значень рівнів факторів дано в таблиці 3.41. При цьому оптимальний план ПФЕ, отриманий методом випадкового пошуку, добудовуємо методом ітераційного планування експерименту до

плану РЦКП шляхом додавання рядків. Вихідний і оптимальні плани РЦКП, відповідно до якого проводили дослідження, наведено в таблиці 3.42.

Таблиця 3.40 - Порівняльний аналіз методів при дослідженні терморегулятора

Метод оптимізації	Вартість реалізації експерименту, ум.од.	Виграш, раз
Аналіз перестановок	130	1,56
Випадковий пошук (перестановка рядків матриці планування)	81,6	2,48
Рой часток	69	2,93
Табу-пошук	72	2,81
Випадковий пошук (перестановка стовпців матриці планування)	124	1,6

Таблиця 3.41 - Вартості змін значень рівнів факторів

Вартості змін значень рівнів факторів	Позначення факторів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
з «-1» в «-α»	1,2	1,4	15,0	1,0
з «+1» в «-α»	4,8	5,6	60,0	4,0
з «-1» в «+α»	4,0	4,8	120,0	3,2
з «+1» в «+α»	2,0	2,4	60,0	1,6
з «0» в «-α»	2,0	2,4	60,0	1,6
з «0» в «+α»	2,0	2,4	60,0	1,6
з «-α» в «0»	2,0	2,4	60,0	1,6
з «+α» в «0»	2,4	2,8	30,0	2,0
з «-α» в «+α»	8,0	9,6	240,0	6,4
з «+α» в «-α»	9,6	11,2	120,0	8,0
з «-1» в «0»	1,3	1,6	40,0	1,1
з «+1» в «0»	1,6	1,9	20,0	1,3

Порівняльну характеристику запропонованих методів при дослідженні напівпровідникового терморегулятора дано в таблиці 3.43. Вартість вихідного плану становить 384,0 ум. од., а максимальна вартість - 384,9, ум. од. [21].

Таблиця 3.42 - Вихідний і оптимальні плани ОЦКП

Вихідний план					Оптимальний план (табу-пошук)					Оптимальний план (рій часток)				
Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів				Номер досліджу	Позначення факторів			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-α	0	0	0	1	-α	0	0	0	7	0	0	0	-α
2	+α	0	0	0	8	0	0	0	+α	2	+α	0	0	0
3	0	-α	0	0	7	0	0	0	-α	6	0	0	+α	0
4	0	+α	0	0	2	+α	0	0	0	15	0	0	0	0
5	0	0	-α	0	9	0	0	0	0	5	0	0	-α	0
6	0	0	+α	0	10	0	0	0	0	3	0	-α	0	0
7	0	0	0	-α	11	0	0	0	0	4	0	+α	0	0
8	0	0	0	+α	12	0	0	0	0	14	0	0	0	0
9	0	0	0	0	4	0	+α	0	0	12	0	0	0	0
10	0	0	0	0	13	0	0	0	0	13	0	0	0	0
11	0	0	0	0	3	0	-α	0	0	11	0	0	0	0
12	0	0	0	0	6	0	0	+α	0	1	-α	0	0	0
13	0	0	0	0	14	0	0	0	0	9	0	0	0	0
14	0	0	0	0	15	0	0	0	0	10	0	0	0	0
15	0	0	0	0	5	0	0	-α	0	8	0	0	0	+α

Таблиця 3.43 - Порівняльна характеристика методів при дослідженні напівпровідникового терморегулятора

Метод оптимізації	Вартість реалізації експерименту, ум. од.	Виграш, раз
Аналіз перестановок	193,4	1,99
Випадковий пошук	166,2	2,31
Рій часток	147,1	2,61
Табу-пошук	152,3	2,53

Розроблені програми дозволяють знайти мінімальну вартість проведення багатфакторного експерименту (БФЕ), послідовність реалізації дослідів, вигрaш порівняно з вихідною матрицею планування і час рахунку. При дослідженні напівпровідникового терморегулятора отримано послідовності проведення дослідів (див. таблиці 3.39, 3.42), при яких вартість проведення експерименту мають менші значення, ніж при використанні методу обмеженого перебору. У результаті проведеного дослідження було вирішено актуальне завдання отримання послідовності дослідів при проведенні багатфакторного експерименту, яка дає можливість отримати його мінімальну вартість.

На прикладах дослідження ваговимірювальної системи і терморегулятора доведено працездатність і ефективність запропонованих методів. При дослідженні напівпровідникового терморегулятора найбільші вигрaші дозволив отримати метод рою часток. Також цей метод має більші показники швидкості, ніж методи табу-пошуку і випадкового пошуку.

Проведене дослідження може бути корисним науковцям, які цікавляться методами планування експериментів, а також різними методами оптимізації параметрів системи. Розроблене програмне забезпечення, що реалізує запропоновані методи, а також проведені експерименти, які підтверджують його працездатність, можна рекомендувати для формування оптимальних матриць планування експерименту. Пошук оптимального або близького до оптимального плану, отриманого методом рою часток, реалізується за менший час рахунку, ніж при методі гілок і меж. Показано, що для оптимізації планів ОЦКП і РЦКП доцільно використання методу рою часток.

Резюме до розділу 3

При прорахунку контрольних прикладів з інтервалами варіювання факторів на двох рівнях вигрaші в результатах оптимізації методом рою часток, отримано більші, ніж при методах на основі табу-пошуку і випадкового пошуку.

ку, і однакові з повним перебором (для кількості факторів $k=3$). Також із застосуванням розроблених методів проведено оптимізацію багатфакторних планів експериментів з варіюванням факторів на трьох рівнях.

На конкретних прикладах доведено працездатність і ефективність методу рою часток. Пошук оптимального або близького до оптимального плану експерименту, отриманого цим методом, реалізується за суттєво менший час рахунку, ніж при методі гілок і меж і методі випадкового пошуку. Виграш у вартості реалізації планів експериментів при використанні даного методу значно більше, ніж при методах випадкового пошуку і табу-пошуку. Таким чином, найбільш ефективним є метод на рою часток.

Перевірка працездатності таких розроблених методів і програмного забезпечення: табу-пошуку, випадкового пошуку (випадкова перестановка стовпців матриці планування експерименту), рою часток здійснювалася на ряді практичних завдань, вирішених іншими методами оптимізації. Показано, що для оптимізації планів ОЦКП і РЦКП доцільно використання методу рою часток, бо пошук оптимального або близького до оптимального плану, отриманого цим методом, реалізується за менший час рахунку, ніж при методі гілок і меж.

Застосування розробленого програмного забезпечення, ґрунтованого на використанні методів табу-пошуку, випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування), рою часток, ефективно при кількості факторів $k \geq 3$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 3

1. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента. Полтава: издатель Шевченко Р.В., 2013. 317 с.

2. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатфакторного експерименту з використанням алгоритму випадкового пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію автор-

ського права на твір № 63747. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 22.01.2016.

3. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатофакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 63466. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 06.01.2016.

4. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма табу-поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 52. С.116-123.

5. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатофакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 68265. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

6. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода табу-поиска для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 53. С.85-91.

7. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода табу-поиска для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вып. 73. С.87-93.

8. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 68266. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

9. Кошовий М. Д., Беляєва А. А. Дослідження режимів роботи оператора радіолокаційної системи (РЛС). *Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє»* /за заг. редакцією В.В.Балабіна. К.: ВІКНУ, 2016. С.52.

10. N. D. Koshevoy, Beliaieva A. A. , Rozhnova T.G. Optimal planning methods for measurements in limited material resources conditions. *28th International scientific symposium «Metrology and metrology assurance 2018»*:Proceedings - Technical University of Sofia Publishing house of the Technical University of Sofia, Prepress Softtrade, 130 Issues–September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria. P.327-330.

11. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Gordienko V. A., Syroklyn V. P. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment. *Telecommunications and Radio Engineering*. Danbury, США, 2011. Vol.70. №8. P.731-734.

12. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатofакторного експерименту з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 71242. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

13. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Беяева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследованиии весоизмерительной системы и терморегулятора. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запорожье: ЗНТУ, 2018. Вип. 4 (47). С.179-187. (Web of Science)

14. Кошевой Н. Д., Беяева А. А. Применение метода роя частиц для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім.Т.Г.Шевченка*. Київ.:ВІКНУ, 2017. Вип. 55. С.46-51.

15. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 71243.

Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

16. Соколовская Е. И. Моделирование процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами. Математическое моделирование. Москва, 2010. №1(22). С. 43-45.

17. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода роя частиц для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*: сб. наук. пр. Харьков: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Вып. 1(81). С.69-75.

18. Терморегулятор: пат. 121097 Україна: МПК G05D 23/19. №U201705879; заявл. 12.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл.№22.

19. Барабашук В. И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. Киев:Техника, 1984. 200с.

20. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторного эксперимента. *Тезисы докладов XIV Международного научно-технического семинара «Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (УМ-2017)»*. Болгария, Созополь, 2017. С.58.

21. Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании терморегулятора. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017»*: збірник матеріалів конференції. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Том 2. С.106.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1 Розробка пристрою для проведення багатofакторного експерименту

При використанні експериментальних досліджень для розроблення нової продукції і технологій основний час витрачається на збір даних і їх оброблення. Особливе значення для підвищення ефективності науки набуває автоматизація наукових досліджень, що дозволяє отримувати більш точні та повні моделі досліджуваних об'єктів і явищ, прискорювати хід наукових досліджень і знижувати їх трудомісткість, вивчати складні об'єкти і процеси, дослідження яких традиційними методами важке або неможливе. Автоматизація експериментів є основою як фундаментальних, так і прикладних досліджень і являє собою комплекс засобів і методів для прискорення збору і оброблення експериментальних даних, інтенсифікації використання експериментальних установок, підвищення ефективності роботи дослідників. Автоматизовані системи наукових досліджень (АСНД) використовуються для аналізу гіпотез, отримання математичних моделей, які відповідають заданим вимогам, оброблення результатів досліджень і вимірювань. Основні вимоги до АСНД: швидкодія, висока надійність, гнучкість, наявність системи контролю, діалоговий режим роботи тощо.

Велика розмаїтість дорогих експериментів призвела до необхідності розроблення систем автоматизації, що вирішують окремі класи завдань. АСНД знайшли застосування у різних галузях, наприклад, при проведенні наукових досліджень в авіа- та ракетобудуванні, для розрахунку і моделювання як фізичних так і хімічних процесів, під час проведення асоціативних експериментів, а також оброблення даних від датчиків і зчитувальних пристроїв і ін.

У результаті використання АСНД зменшується термін проведення досліджень, і в той же час збільшуються точність і достовірність отриманих резуль-

татів, зростають інформативність і якість експерименту за рахунок більшої кількості контрольованих параметрів і більш ретельного оброблення отриманих значень, а також посилюється контроль під час проведення експерименту.

Для того щоб автоматизувати проведення багатofакторного експерименту було розроблено пристрій [1], функціональну схему якого зображено на рисунку 4.1.

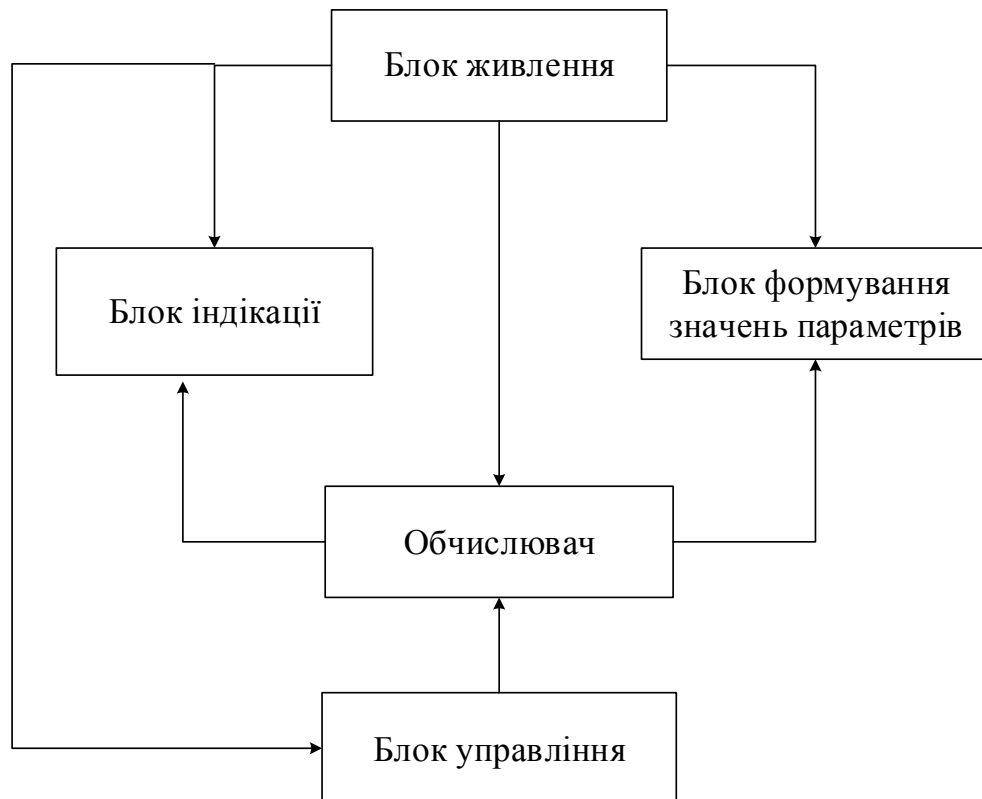


Рисунок 4.1 - Функціональна схема пристрою

Пристрій складається з:

- блоку живлення;
- блоку індикації;
- обчислювача;
- блоку формування значення параметрів;
- блоку керування.

В основу алгоритму роботи пристрою для проведення багатofакторного експерименту покладено застосування оптимальних комбінаторних планів. При

використанні цієї системи експериментатор має змогу вибрати різні варіанти для плану проведення експерименту, а система, що налаштована на реалізацію цього плану, має змогу послідовно генерувати відповідні значення рівнів факторів. Після налаштування пристрій для проведення багатофакторного експерименту працює таким чином. У блок управління, який виконано у вигляді роз'єму для SD карти, надходять вартості варіантів реалізації. Потім ці дані знаходять до обчислювача, де відбувається визначення варіанта, що має найменшу вартість. На індикатор (блок індикації) виводиться номер оптимального варіанта, а потім він надходить до блоку формування значень параметрів, який виконано у вигляді СОМ-порта. Блок живлення здійснює подання напруги до усіх функціональних блоків. Розроблений пристрій дозволяє під час вибору оптимального плану проведення експерименту враховувати вартості змін рівнів факторів, що своєю чергою дозволяє зменшити час для оброблення результатів, а також істотно зменшити вартість проведення експериментів. Також було розроблено програму для формування каталогів оптимальних планів проведення експериментів [2], яка може використовуватися для роботи обчислювача.

4.2 Розроблення ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів та її складових частин

4.2.1 Розроблення ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів

Розроблена корисна модель належить до засобів, що служать для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу. Вона може застосовуватися для багатьох підприємств харчової, гірничорудної та металургійної промисловостей.

Ваговимірювальна система для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів складається з бункера 1 і похилого вимірювального лотка у

формі прямокутника з електроприводом, який зв'язано за допомогою шарнірних з'єднань з трьома тензорезистивними датчиками сили (ТДС) [3]. Під бункером встановлено стрічковий конвеєр з електроприводом, а також датчики швидкості руху стрічки, температури, розтягування стрічки, які було розміщено у бункері. Датчик вологості матеріалу, кінцеві вимикачі, а також дозатор та електровібратор розміщені на конвеєрі. З блоком індикації з'єднано мікропроцесор, до якого підключено три аналого-цифрові перетворювачі. Мікропроцесор також з'єднано з функціональною клавіатурою, накопичувачем пам'яті, адресним дешифратором, оперативним запам'ятовувальним пристроєм, регістром адреси. Цифро-аналоговий перетворювач підключено до електроприводів стрічкового конвеєра та похилого вимірювального лотка, дозатора й електровібратора, а тензорезистивні датчики сили з'єднано із аналого-цифровими перетворювачами. До складу системи також уведено терморегулятор, а до нього в свою чергу підключено датчик температури.

Відома ваговимірювальна система, до складу якої входять бункер і похилий вимірювальний лоток у формі прямокутника [4]. Недоліками цієї системи є: відсутність управління такими параметрами: кутом нахилу вимірювального лотка, температурою і вологістю матеріалу, а також неможливість моделювання процесів вимірювання вагової витрати гранульованих матеріалів.

Найбільш близькою до розробленої корисної моделі є ваговимірювальна система [5], яка складається з бункера та похилого вимірювального лотка прямокутної форми з електроприводом, який зв'язано за допомогою шарнірних з'єднань з трьома тензорезистивними датчиками сили. Недоліком вказаної вище ваговимірювальної системи є відсутність стабілізації температури гранульованого чи порошкоподібного матеріалу.

В основі розроблення нової корисної моделі покладено задачу забезпечення можливості стабілізації температури гранульованого матеріалу. Було застосовано нові елементи, такі, як терморегулятор, а також те, що до терморегуля-

тора підключено датчик температури. Це дало можливість стабілізувати температуру гранульованого чи порошкоподібного матеріалів.

Загальний вигляд системи і конструкцію ваговимірювального лотка показано на рисунку 4.2, а функціональну схему ваговимірювальної системи - на рисунку 4.3.

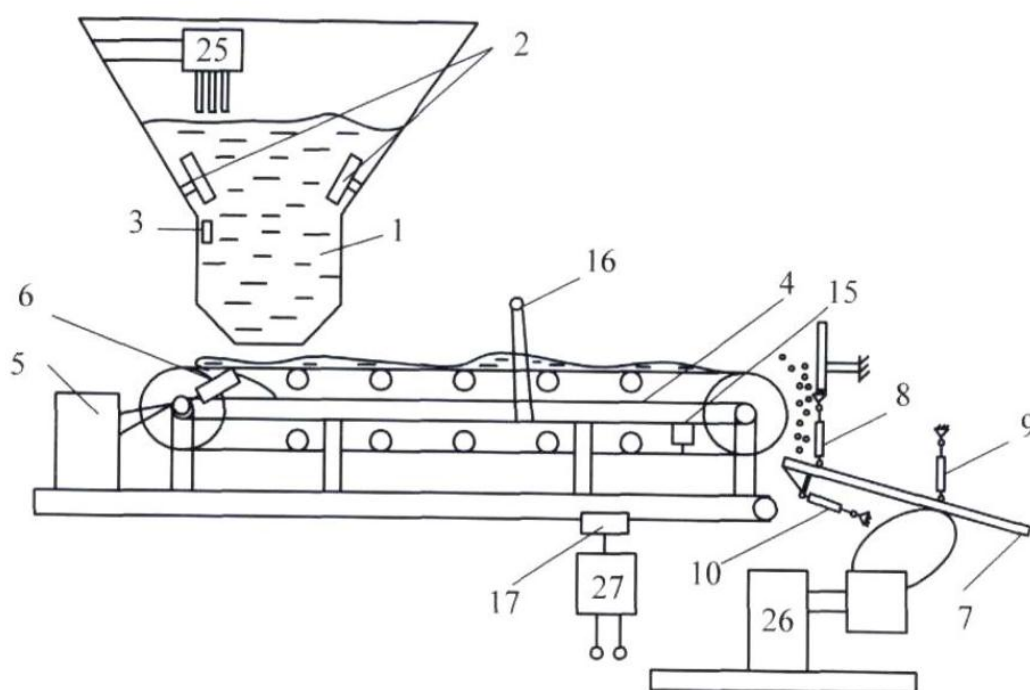


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд ваговимірювальної системи

До складу ваговимірювальної системи входять бункер 1 з компонентом, який дозується, електровібратор 2, датчик вологості матеріалу 3. Датчик вологості матеріалу розташований у бункері 1. Під бункером 1 знаходиться стрічковий конвеєр 4 із електроприводом 5. До стрічкового конвеєра 4 підключено датчик швидкості руху стрічки 6. Під конвеєром 4 закріплено похилий вимірювальний лоток 7, який за допомогою шарнірних з'єднань поєднано з трьома тензорезистивними датчиками сили 8, 9, 10, які підключені до відповідних аналого-цифрових перетворювачів 11, 12, 13, що в свою чергу з'єднані з мікро-

процесором 14. Датчик розтягання стрічки 15, датчик швидкості руху стрічки 6 конвеєра 4, а також кінцеві вимикачі 16, що закріплені безпосередньо на конвеєрі 4 і датчик температури 17, підключені також до мікропроцесора 14, який в свою чергу з'єднаний з адресним дешифратором 18 і накопичувачем пам'яті 19. До мікропроцесора 14 також підключено оперативний запам'ятовувальний пристрій 20, регістр адреси 21, блок індикації 22 і функціональну клавіатуру 23. Цифро-аналоговий перетворювач 24 підключено до електроприводу 5 та електровібратора 2. Через цифро-аналоговий перетворювач 24 до мікропроцесора 14 підключені дозатор 25, що розташовується у бункері 1, та електропривод 26 вимірювального лотка 7. До терморегулятора 27 підключений датчик температури 17.

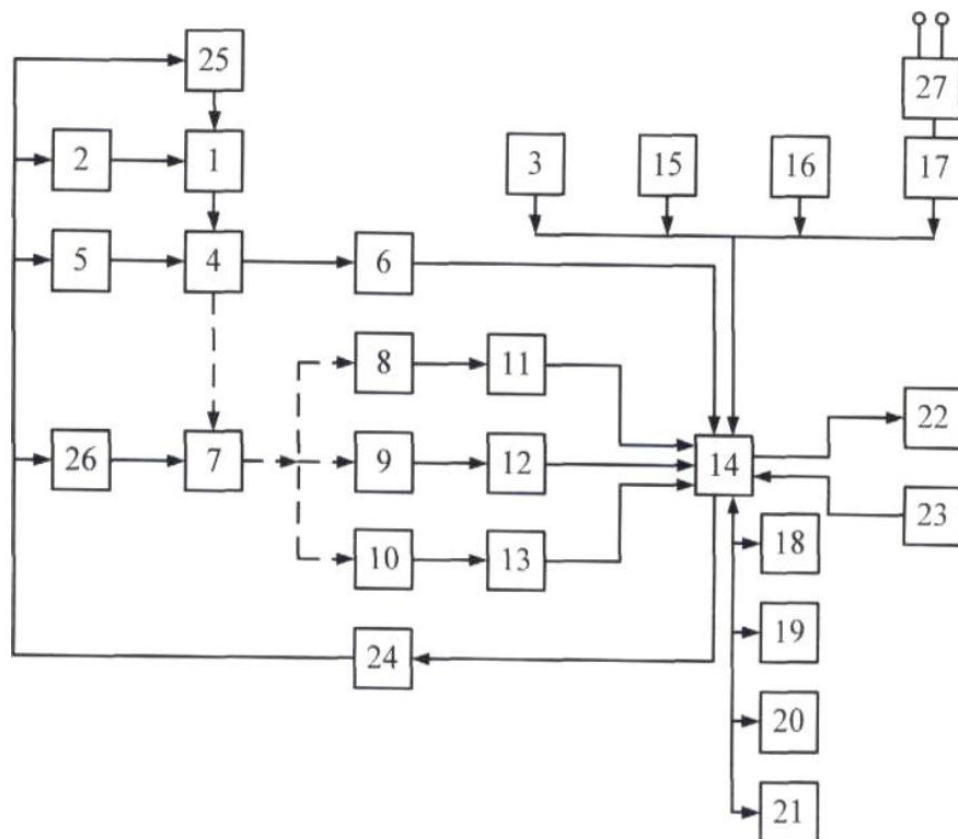


Рисунок 4.3 - Функціональна схема ваговимірювальної системи

Працює ваговимірювальна система таким чином. З бункера 1 надходить шихта на стрічковий конвеєр 4, а після цього - на вимірювальний лоток 7. Контроль за надходженням гранульованого або порошкоподібного матеріалів на стрічковий конвеєр відбувається за допомогою застосування кінцевих вимикачів 16, які розташовані над поверхнею стрічкового конвеєра 4. Якщо сипкий матеріал надходить у необхідній кількості на стрічковий конвеєр 4, то кінцеві вимикачі 16 не спрацьовують, а у разі недостатньої кількості - спрацьовують. Якщо кінцеві вимикачі 16 спрацювали, подається сигнал до мікропроцесора 14, а з нього через цифро-аналоговий перетворювач 24 сигнал передається на електровібратор 2. Якщо надходження гранульованого або порошкоподібного матеріалів не розпочалося, мікропроцесор 14 видає сигнал зупинки до електропривіду 5 стрічкового конвеєра 4, а також на блок індикації 22 - сигнал для аварійної зупинки стрічкового конвеєра 4. З конвеєра гранульований або порошкоподібний матеріал безпосередньо надходить на вимірювальний лоток 7.

Гранульований або порошкоподібний матеріал, що пересувається по вимірювальному лотку 7, впливає на тензорезистивні датчики сили розтягування (ТДС) 8, 9, 10. З ТДС сигнали передаються через аналого-цифрові перетворювачі 11, 12, 13 та обробляються мікропроцесором 14. У розробленій системі використовуються шарнірні кріплення усіх вузлів, що дозволило позбутися поперечних сил моментів, які виникають у разі деформацій окремих деталей і вузлів монтажу, а також температурного впливу.

Для того щоб урахувати вплив вологості гранульованого або порошкоподібного матеріалу використовується датчик вологості 3, який безпосередньо сполучено з мікропроцесором 14. Якщо вологість матеріалу не збігається із заданим значенням, мікропроцесор 14 за допомогою цифро-аналогового перетворювача 24 передає сигнал на дозатори 25, щоб змінити вологість матеріалу. У той же час відбувається перемішування сипкого матеріалу в бункері 1, з використанням електровібратора 2, який підключається. Через цифро-

аналоговий перетворювач 24 мікропроцесор 14 також видає сигнал на електропривід 26, щоб установити відповідний кут нахилу вимірювального лотка 7.

Для того щоб урахувати вплив температури на якість вимірювання застосовується датчик температури 17, який введено до складу терморегулятора 27 і підключено до мікропроцесора 14. Це дає змогу забезпечити стабілізацію температури шихти.

Кількість шихти, що поступає на вимірювальний лоток 7, можливо регулювати змінюючи швидкість руху стрічки конвеєра 4. Для того щоб це реалізувати у системі застосовується датчик швидкості руху конвеєрної стрічки 6:

- якщо витрата шихти не є недостатньою, мікропроцесор 14 передає сигнал до електропривода 5 конвеєра 4 для того, щоб підвищити швидкість руху конвеєрної стрічки;

- якщо витрата шихти перевищила задане значення, мікропроцесор 14 передає сигнал до електропривода 5 конвеєра 4 для того, щоб зменшити швидкість руху конвеєрної стрічки.

Процес відбувається доти, доки витрата сипкого матеріалу не буде такою, що дорівнює заданому значенню.

Мікропроцесором 14 розраховується вага гранульованого або порошкоподібного матеріалу за допомогою сигналів, що прийшли через аналого-цифрові перетворювачі 11, 12, 13 з тензорезистивних датчиків сили розтягування 8, 9, 10.

Можливість управління кутом нахилу вимірювального лотка, швидкістю руху стрічки конвеєра, вологістю і температурою сипкого матеріалу дозволило забезпечити високу точність для дозування сипкого матеріалу, а також підвищити точність вимірювання ваговимірювальної системи.

На точність вимірювання системи впливає багато факторів. Одним з найважливіших факторів є температура. Для підвищення точності вимірювань були розроблені: волоконно-оптичний датчик вологості та температури, два терморегулятори, два біметалевих датчики температури.

4.2.2 Розроблення волоконно-оптичного датчика для вимірювання вологості та температури

Оптичні волокна застосовуються для вимірювання фізичних і хімічних параметрів різних середовищ. Виконано багато досліджень і наукових розробок у галузі застосування оптичних хвилеводів у різних галузях промисловості. Також продемонстровано, що управління виробничими процесами може ефективно здійснюватися за допомогою різних волоконно-оптичних пристроїв [6].

Волоконно-оптичні датчики (ВОД) відрізняються високою чутливістю, зберігають працездатність у широкому оптичному діапазоні, компактні, мають низьку собівартість у масовому виробництві і високу надійність порівняно з традиційними електричними датчиками.

ВОД часто використовують в агресивному зовнішньому середовищі, де під впливом високих температур, корозійних речовин, високого рівня електромагнітних перешкод або при загрозі вибуху традиційні електричні датчики не можуть працювати належним чином.

Поширеною областю практичного застосування ВОД температури є високотемпературні вимірювання, коли ВОД температури, які основані на тугоплавкому скляному волокні, мають явні переваги порівняно з електронними тензодатчиками або ємнісними датчиками, в яких металеві дріт'яні з'єднання схильні до впливу високих температур, при тривалій експлуатації електричні датчики втрачають свої точнісні характеристики або зовсім виходять з ладу. Іншою перевагою ВОД є мале загасання оптичного сигналу в оптоволокні, що дозволяє розміщувати датчики на великій відстані з блоками електронної обробки сигналів. Оскільки оптичне волокно є діелектричним середовищем, воно не випромінює і не схильне до (принаймні в першому наближенні) впливу електромагнітних завад [7], тому знайшло широке використання в сучасних оптичних датчиках і системах, що працюють в екстремальних умовах атомної, наф-

тогазової і авіакосмічної галузей, у суднобудуванні, у гідротехніці, в енергетиці, у військових і стихійних надзвичайних ситуаціях [8 - 10].

Волоконно-оптичні датчики використовуються для контролю широкого спектра параметрів навколишнього середовища, таких, як: вібрація, деформація, температура, вологість, в'язкість, різні хімічні речовини, тиск, струм, електричне поле та деякі інші фактори навколишнього середовища [11 - 15].

Усі волоконно-оптичні датчики з локалізації вимірюваного параметра можна розділити на три типи: точкові, розподілені і квазірозподілені. Точкові волоконно-оптичні датчики мають малий за розміром чутливий елемент. Розподілені оптоволоконні датчики дозволяють виводити безперервний контроль параметрів (температура, тиск) по всій довжині (об'єму) контролюваного об'єкта в будь-якій його точці, де встановлено сенсорний світловод.

Основні принципи вимірювання розподілених волоконно-оптичних датчиків ґрунтуються на виявленні зворотнього розсіювання світла, наприклад, на основі релєєвського [16], рамановського [17] і бріллюєновського [18] розсіювання.

У зв'язку з цим було винайдено волоконно-оптичний датчик, який має відношення до сфери приладобудування і який можливо використовувати для вимірювання таких параметрів: вологість, температура [19], зокрема у розробленій ваговимірювальній системі.

Існує широко відомий волоконно-оптичний датчик клімат-контролю [20]. Його основа виконана з кварцового скла, а до неї приварена перфорована скляна трубка. На основі, що виконана із кварцевого скла, блока гігроскопічного матеріалу утворено віддзеркалюючий шар, який розміщено поміж спіральним відрізком основного світловода та безпосередньо віддзеркалюючим шаром. Перший прямий відрізок основного світловоду коаксіально і нерозрізно приєднано до віддзеркалюючого шару скляної трубки. Спіральний відрізок розташований концентрично відносно самої скляної трубки. Біметалева пластин-

ка прикріплена до другого прямого відрізка основного світловоду та скляної заглушки між самим світловодом і трубкою.

Основними недоліками зазначеного вище пристрою, які виникли через використання біметалевої пластини і спіральної ділянки світловоду, є:

- виникнення необхідності постійної корекції мікронеідентичностей, що призводять до деформацій і старіння елементів спіралі;
- неможливо компенсувати деградаційні процеси, які протікають з різною швидкістю на вільному боці, до якого приварено біметалеву пластинку.

Найбільш відомим і наближеним до розробленого є волоконно-оптичний датчик клімат-контролю [21]. Він може бути використаний для отримання показників як вологості, так і температури. Він складається з перфорованої колби з кварцового скла. До цієї колби прикріплено взаємно приварені заглушка і основний світловод.

До основного світловоду в свою чергу та від нього через волоконний розгалужувач, що має оптичні фільтри у кожній лінії, надходить, а потім відводиться випромінювання. Мідну трубку розміщено коаксіально до самого світловоду, а також первинної і вторинної гілок світловоду, блоку гігроскопічного матеріалу, який знаходиться між вторинною гілкою світловоду і колбою, а також віддзеркалюючого шару, що утворений на торцевій поверхні вторинної гілки світловоду.

Головною особливістю є те, що первинна і вторинна гілки закріплені із забезпеченням можливості змінювання радіуса згину між ними. Саму мідну трубку було безпосередньо зварено із основним світловодом.

Через те що волоконно-оптичний датчик клімат-контролю має лише один канал вимірювання вологості та температури, виникають такі недоліки датчика:

- через взаємний вплив вимірювальних параметрів зменшена точність результатів вимірювання;
- низька технологічність виготовлення датчика через існування необхідності згину світловоду і його прикріплення в цьому положенні.

Під час розроблення корисної моделі датчика основною задачею стало підвищення технологічності виготовлення датчика, а також вилучення взаємного впливу параметрів, що вимірюються, на отримувані результати вимірювання.

Як наслідок було розроблено волоконно-оптичний датчик, що використовується для вимірювання вологості та температури [19]. Для того щоб вилучити взаємний вплив параметрів, що вимірюються, на отримані результати вимірювання і збільшити технологічність виготовлення датчика, було застосовано додаткові елементи, а саме: додатковий світловод з волоконним розгалужувачем, що містить оптичні фільтри у кожній лінії і віддзеркалюючий шаром на його торці, а також і зв'язки поміж ними.

На рисунку 4.4 показано конструкцію волоконно-оптичного датчика, що може використовуватися для вимірювання як вологості, так і температури.

Волоконно-оптичний датчик, що може використовуватися для вимірювання вологості та температури, складається з: колби 1, що виготовлена з кварцового скла і містить отвори перфорації 2 і заглушку 3. До колби за допомогою використання методу плазмового зварювання було приєднано як основний світловод 4, так і додатковий світловод 5.

Також до складу датчика входять волоконні розгалужувачи 6, 7 з вхідними оптичними фільтрами 8, 9 і вихідними оптичними фільтрами 10, 11. Мідна трубка 12 коаксіально розміщена відносно додаткового світловоду 5 і зварена з ним. Блок гігроскопічного матеріалу 13 розміщено поміж поверхнею колби 1 і основного світловода 4. На торцевих поверхнях світловодів 4, 5 були створені віддзеркалюючі шари 14, 15 відповідно.

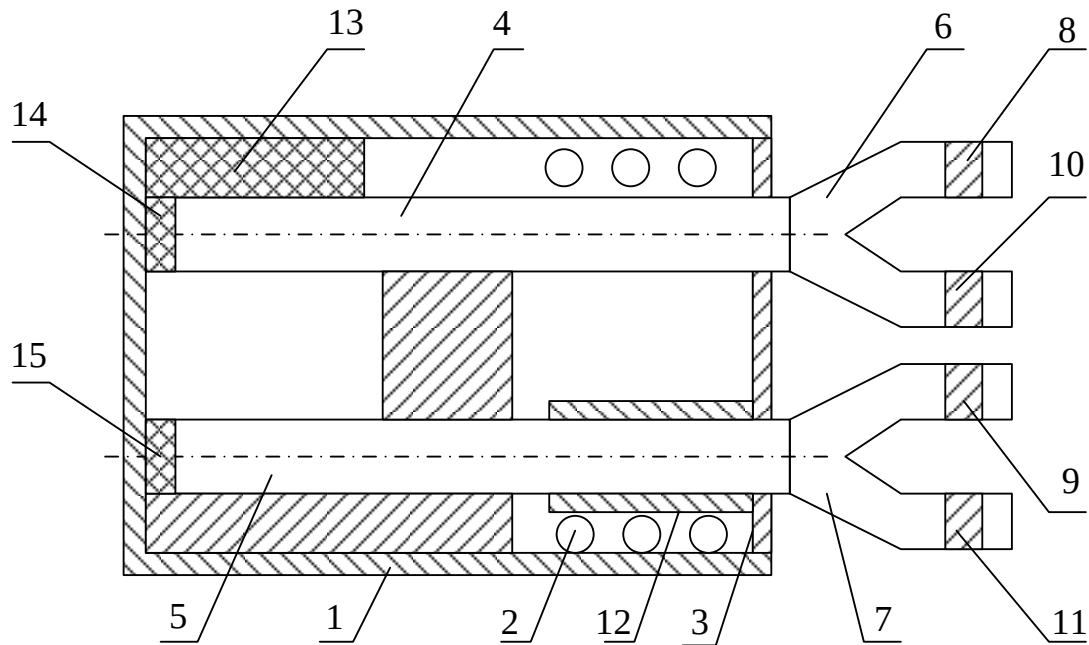


Рисунок 4.4 - Конструкція волоконно-оптичного датчика для вимірювання вологості та температури

Розроблений волоконно-оптичний датчик, що може використовуватися для вимірювання вологості та температури, працює так: при змінюванні вологості середовища, що контролюється, відбудеться зміна об'єму блока 13, який виконано з гігроскопічного матеріалу. Як наслідок, відбудуться зміни лінійних розмірів самого блока і величини прогина світловоду 4. Так у основному світловоді 4 відбувається порушення умов для повного внутрішнього відбивання світла. Це порушення умов для повного відбивання світла всередині основного світловода 4 призводить до зміни величин інтенсивності світлового випромінювання, яке своєю чергою відбивається від поверхні віддзеркалюючого шару 1. Величина вимпромінювання, що реєструється на виході волоконного розгалужувача 6 оптичного фільтра 10, є пропорційною відносно величини контрольованої вологості.

При зміні температури контрольованого середовища відбудеться теплове розширення мідної трубки 12, яка приварена до додаткового світловоду 5. Зміна самої геометрії трубки призводить до зміни геометрії світловоду 5, що,

своєю чергою, призводить до витрат потужностей оптичного випромінювання. Величина випромінювання, що зареєстрована на виході волоконного розгалужувача 7 оптичного фільтра 11, виходить пропорційною відносно величини зміни температури.

Так, додавання ще одного світловоду для вимірювання показників температури контрольованого середовища призводить до вилучення взаємного впливу вимірюваних параметрів на самі результати вимірювання, оскільки вимірювання вологості та температури відбувається через окремі незалежні канали.

Використання і розміщення прямолінійних відрізків світловодів приводить до підвищення технологічності виготовлення волоконно-оптичного датчика.

4.2.3 Удосконалення терморегуляторів

Вимірювання і регулювання температури необхідне для злагодженої роботи об'єктів, для корекції характеристик або компенсації параметрів технологічних процесів [22]. Автоматичний регулятор температури - це пристрій, який використовується для підтримки керованої величини температури на заданому рівні або зміни її відповідно до заданого закону регулювання [23, 24]. Різницю між фактичним і заданим значеннями регульованої величини сприймає автоматичний регулятор, а потім перетворює її в дію, яка впливає на регулюючий орган. Відповідно до закладеного в регулятор закону регулювання формується керуючий вплив [25].

Задача вибору самого закону управління, а також типу регулятора полягає в такому - необхідно обрати такий вид регулятора, який би при мінімальній вартості і у той же час максимальній надійності забезпечив би визначену якість регулювання [26 - 28]. Тому виникла задача розробити терморегулятор для винайденої ваговимірювальної системи.

У [29, 30] було розглянуто простий спосіб динамічної корекції коефіцієнта передачі автоматичного регулятора температури внаслідок зміни в широкому

діапазоні коефіцієнта передачі об'єкта. Більш ретельний і поглиблений розгляд фізичного процесу, що відбувається в реальному об'єкті регулювання, зазвичай дозволяє виявити в ньому «внутрішній» керуючий вплив [31].

Розроблений терморегулятор належить до галузі приладобудування і може бути використаний для термостатів та іншого технологічного обладнання, в якому необхідно забезпечити автоматичну підтримку сталої температури.

Широке визнання отримав терморегулятор в колі змінного струму [32]. Терморегулятор складається з таких складових частин: нагрівача, тиристора, що використовується як виконавчий елемент, а також резистора у колі керуючого електрода та термометричного ртутного датчика у вигляді капілярної трубки, всередині якої знаходиться ртуть. Ртутний датчик увімкнено між катодом тиристора та керуючим електродом, а паралельно зустрічно тиристорі підключено діод із вимикачем у його колі.

Основним недоліком цього пристрою є те, що він дозволяє регулювати лише половину потужності нагрівача, а для переходу з половинного у повний діапазон регулювання необхідно організовувати ручне керування вимикачем.

Найбільш схожим до розробленого є терморегулятор [33]. Він містить: нагрівач, резистори, що знаходяться у колі керуючих електродів, два зустрічно-паралельно підключених тиристори, а також термометричний ртутний датчик, який виконано у формі капілярної трубки всередині зі ртуттю. Ртутний датчик умикається між резисторами, а у самій точці поєднання підключено анодами по два діоди, а один катод підключено до керуючого електрода тиристора, а інший з катодом зустрічно-паралельних тиристорів.

Основними недоліками цього терморегулятора є: небезпечність роботи з термометричним ртутним датчиком, який виготовляється у вигляді капілярної трубки всередині зі ртуттю, а також недостатня надійність, що зумовлена наявністю у складі виробу такого датчика.

В основі корисної моделі розробленого терморегулятора [34] - важлива задача забезпечення безпечної роботи із терморегулятором, а також збільшення надійності його роботи.

Застосування біметалевого термометра, який включено між резисторами, дозволяє роботу з термометром зробити безпечною, а також підвищує його надійність.

На рисунку 4.5 показано принципову електричну схему розробленого терморегулятора.

Терморегулятор складається з нагрівача 1 і двох зустрічно-паралельно включених тиристорів 2, а також біметалевого термометра 3, який увімкнено між резисторами 4. Резистори 4 іншими виводами з'єднані з анодами відповідних тиристорів 2. До точок з'єднання біметалевого термометра 3 і резисторів 4 підключено анодами по два діоди 5 і 6. Катоди елементів поєднано відповідно: діод 5 з керуючим електродом, а діод 6 з анодом зустрічно паралельних тиристорів 2.

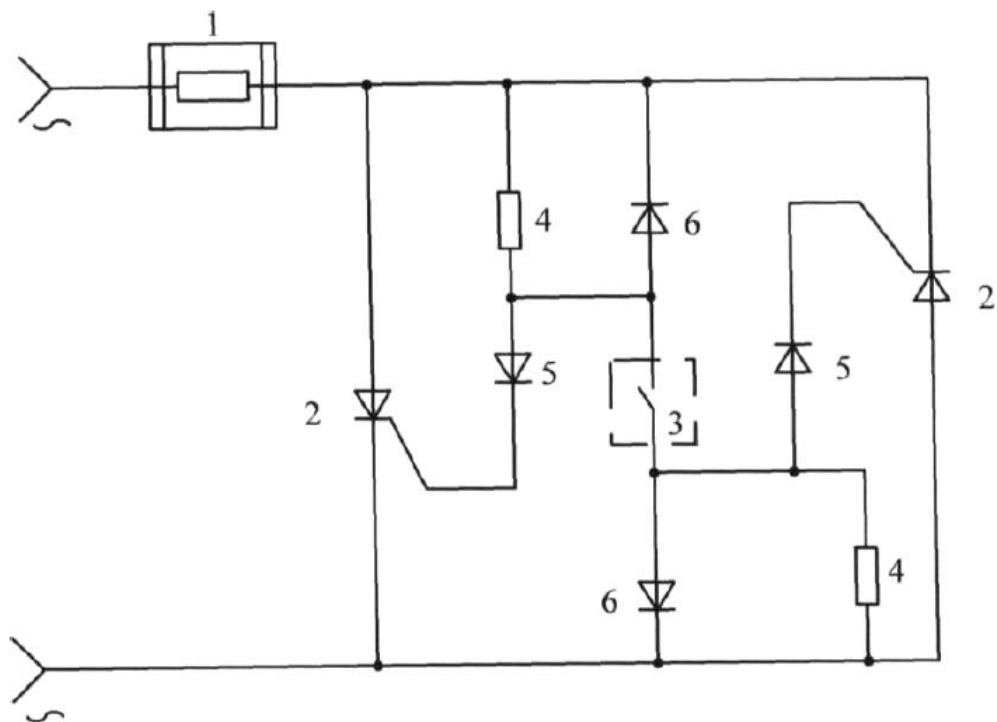


Рисунок 4.5 - Принципова електрична схема терморегулятора

Терморегулятор працює так: положення контакту термометра біметалевого 3 у вихідному стані розімкнуте, при цьому в кожний напівперіод крізь один із резисторів 4 і діод 5 протікає струм керування, відкриваючи відповідний тиристор 2, тим самим забезпечуючи протікання крізь нагрівач 1 струму навантаження.

При збільшенні температурних показників, що контролюються, біметалева пластина вигинається і тим самим замикає виводи контактів термометра 3. При цьому в кожний напівперіод шунтуються напівпровідниковий перехід керування зустрічно-паралельних тиристорів 2 через контакт термометра 3 і один із діодів 6. Тиристири замикаються, тим самим знеструмлюючи навантаження нагрівача 1. Так застосування біметалевого термометра, що включений поміж резисторів, дозволяє забезпечити безпечну роботу із самим терморегулятором, а також підвищити його надійність.

Також було розроблено другий терморегулятор. При створенні корисної моделі головними задачами стали підвищення надійності терморегулятора, а також забезпечення з ним безпечної роботи [35].

Широке визнання отримав терморегулятор у колі змінного струму [32], який складається з нагрівача, в якому виконавчим елементом є тиристор, а також резистора у колі керуючого електрода і датчика. Термометричний ртутний датчик, що був виконаний з ртуттю всередині у формі капілярної трубки, було ввімкнено поміж катодом тиристора та керуючим електродом. Зустрічно-паралельно тиристорі було підключено діод, а у його колі знаходився вимикач.

Особливо важливим недоліком цього пристрою є те, що він дає змогу регулювати лише половину потужності нагрівача, а для того, щоб перейти до повного діапазона регулювання від половинного, він потребує ручного управління вимикачем.

Найбільш наближеним до розробленого є терморегулятор [36], що складається з нагрівача, симістора як виконавчого елемента, оптоелектронного ключа, який розміщено у колі керуючого електрода, резистора, що знаходиться у колі

світлодіода оптопари із діодним мостом, а також термометричного ртутного датчика, який виконано у формі капілярної трубки зі ртуттю. Сам термометричний ртутний датчик безпосередньо з'єднано паралельно відносно світлодіоду оптопари.

Важливим недоліком цього пристрою є недостатня надійність, яка виникає через наявність у складі термометричного ртутного датчика у формі капілярної трубки зі ртуттю та небезпечність роботи з таким датчиком.

Щоб досягти визначеної мети у терморегулятор відповідно до розробленої корисної моделі паралельно до світлодіоду оптопари підключено біметалевий термометр [35]. Використовування біметалевого термометра, який підключено паралельно до світлодіоду оптопари, дозволяє забезпечити безпечну роботу з самим термометром і підвищити його надійність.

На рисунку 4.6 показано принципову електричну схему розробленого терморегулятора.

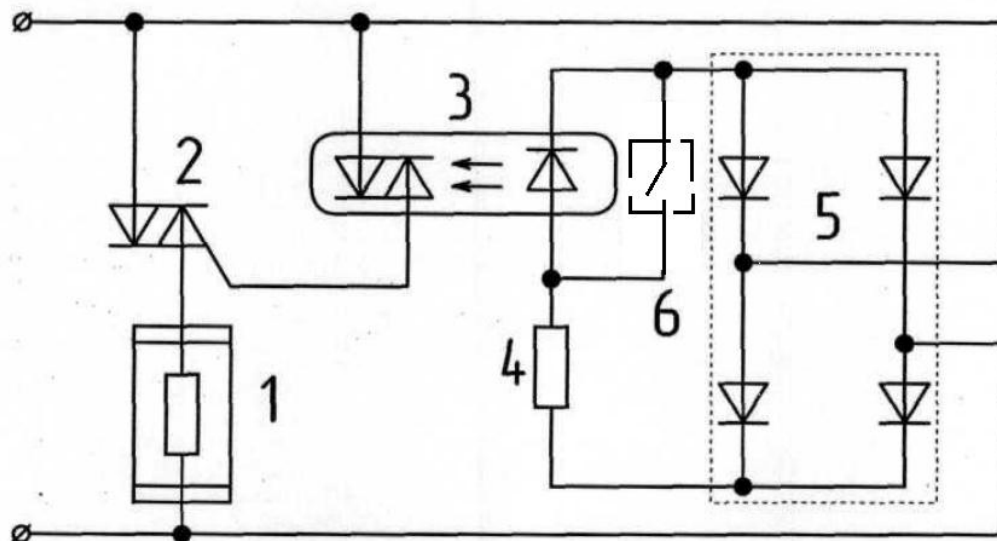


Рисунок 4.6 – Електрична схема терморегулятора

Терморегулятор складається з нагрівача 1 і симістора 2, які увімкнені послідовно. Вихідний симістор оптопари 3 підключено у коло керуючого електрода симістора 2. Вхідний світлодіод опторари 3 увімкнено до напруги мережі

через резистор 4 і діодний міст 5. Біметалевий термометр 6 включено паралельно світлодіоду оптопари 3.

Якщо температура опускається нижче заданої, контакти біметалевого термометра 6 знаходяться у розімкнутому стані. Струм керування протікає через світлодіод оптопари 3, у той же час вихідний симістор оптопари 3 знаходиться у відкритому стані, симістор 2 також відкритий, а через нагрівач 1 проходить струм.

Якщо температура підвищена в контрольній точці, біметалева пластина вигинається і тим самим замикає контакти виводів термометра 6, і шунтує вхідний світлодіод оптопари 3. У цей же час закривається вихідний симістор оптопари 3, також закривається і сам симістор 2, у результаті цього відбувається знеструмлення нагрівача 1.

Так, використання біметалевого термометра, який включається паралельно до світлодіода оптопари, дозволяє забезпечити безпечну роботу з самим терморегулятором і підвищити його надійність.

4.2.4 Розроблення біметалевих датчиків температури

Під час виконання багатьох технологічних процесів необхідно контролювати температуру, зокрема у розробленій ваговимірjuвальній системі. Найчастіше вимірюються: температура рідини, газу, твердої поверхні або сипучого матеріалу. Біметалевий температурний датчик складається із двох пластин, виконаних з різнорідних металів, які скріплюються між собою. Різні види металів мають різний коефіцієнт розширення при різних температурних показниках. Наприклад, константан майже не розширюється при зміні температури, а залізо навпаки зазнає помітного розширення. Якщо скріпити між собою і нагрівати (або охолоджувати) смужки з цих металів, то вони вигнуться. У конструкції біметалевих датчиків пластини замикають або розмикають релейні контакти, а також можуть рухати стрілку індикатору. Робочий діапазон біметалевих дат-

чиків становить від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Біметалеві датчики температури можуть використовуватися для вимірювання температури поверхні твердих поверхонь, рідше - для вимірювання температурних показників рідини. Перевага датчиків полягає в простоті й надійності конструкції, низькій вартісті, а також можливості роботи без електричного струму. Однак біметалеві температурні датчики мають великий розкид характеристик і велике значення гістерезису перемикачання, особливо це проявляється при низьких температурах [37].

Було розроблено корисну модель біметалевого датчика температури, яка належить до вимірювальної техніки і може використовуватися у ваговимірвальній системі. Існує широковідомий біметалевий датчик температури, який у складі має чутливий елемент у формі пружини, що виконана з плоскої біметалевої стрічки. Пружина вкрита тонким шаром металу з великим значенням електропровідності і включена в контур вимірювального LC-генератора. До самого генератора було під'єднано мікроконтролер, у якому знаходився аналого-цифровий перетворювач [38].

Основними недоліками цього біметалевого датчика є: низька чутливість і точність вимірювання, велика вартість, а також складність виготовлення пружини, що знаходиться у складі датчику. Найбільш наближеним до запропонованого є біметалевий датчик температури, який містить конденсатор як чутливий елемент. Обкладинки конденсатора виготовлено з плоских біметалевих пластин і відокремлено одну від іншої безпосередньо шаром діелектрика, а також вони зорієнтовані одна відносно іншої сторонами, що виконані з одного виду металу. Чутливий елемент підключений до контуру LC-автогенератора електричних коливань, до якого в свою чергу приєднано мікроконтролер із аналого-цифровим перетворювачем. Головними недоліками такого виду датчика температури є низька чутливість вимірювання, а також складність конструкції чутливого елемента для виготовлення.

Тому при створенні корисної моделі нового біметалевого датчика температури, поставлено задачу створити такий датчик, виконання якого дозволить

підвищити його чутливість [39] і у той же час спростити конструкцію самого чутливого елемента. Для того щоб вирішити поставлені задачі у біметалевому датчику температури було застосовано чутливий елемент, що являє собою консольно закріплену біметалеву плоску або скручену у формі спіралі пластину. Вільний кінець пластини через передавальний механізм з'єднаний з валом конденсатора змінної ємності, який увімкнений у контур LC-автогенератора електричних коливань. Біметалевий датчик температури також містить чутливий елемент і LC-автогенератор електричних коливань, який з'єднано з мікроконтролером через аналого-цифровий перетворювач. Застосування нових елементів, таких, як конденсатор змінної ємності, біметалева плоска пластина, передавальний механізм, а також зв'язків між ними (тепер вал конденсатора змінної ємності через передавальний механізм з'єднано з вільним кінцем закріпленої біметалевої пластини), дозволило збільшити чутливість вимірювання температури, а також спростити конструкцію датчика і, як наслідок, - спростити складність виготовлення чутливого елемента. На рисунку 4.7 схематично показано розроблений біметалевий датчик температури.

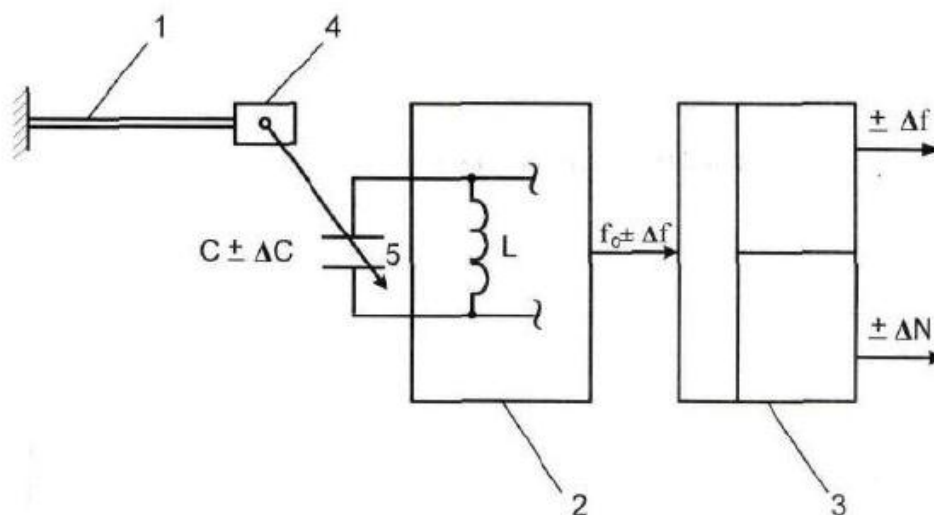


Рисунок 4.7 – Біметалевий датчик температури

До складу датчика входить чутливий елемент 1, LC-автогенератор електричних коливань 2, а також мікроконтролер з аналого-цифровим перетворювачем.

чем 3. Чутливий елемент виконано у формі консольно закріпленої плоскої біметалевої пластини. Через передавальний механізм вільний кінець пластини 4 поєднано з валом конденсатора 5, що має змінну ємність, який своєю чергою ввімкнено до контуру електричних коливань LC-автогенератора 3. Сам чутливий елемент може виготовлятися у вигляді біметалевої пластини, яка скручена у формі спіралі.

Розроблений біметалевий датчик температури працює таким чином. Вал конденсатора змінної ємності займає положення, яке буде відповідати ємності конденсатора C_0 при початковому значенні температури середовища (наприклад, $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$). У цей же час початкове значення частоти LC-автогенератора електричних коливань $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$ передається до мікроконтролера, програма якого дозволяє компенсувати значення частоти і формувати параметри датчика частоти Δf , а також цифрового коду ΔN , які мають пропорційні значення вимірюваної температури. Так на виходах мікроконтролера відбувається встановлення початкових значень вихідних сигналів датчика $\Delta f = 0$ і $\Delta N = 0$. Зміна показників температури на значення ΔT (наприклад, підвищення) призводить до деформаційних змін біметалевої плоскої пластини на величину $F = k_{\text{пр}} \frac{\Delta\pi}{d10^4}$ (мм), у той же час деформаційні зміни для пластини, яка скручена у формі спіралі це значення $F = k_{\text{пр}} \frac{2\Delta\pi^2}{d10^4}$ (мм), де $k_{\text{пр}}$ - коефіцієнт прогину пластини на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, L - довжина біметалу, мм; d - глибина біметалу, мм; ΔT - зміна температури, $^{\circ}\text{C}$. Прогин біметалевої пластини веде до повороту через передавальний механізм вала конденсатора змінної ємності, який спричинює зміну ємності C_0 на величину ΔC , а також частоти f_0 на величину Δf . При цьому на частотному і цифровому виходах мікроконтролера відбувається встановлення значень частоти Δf та цифрового коду ΔN , які мають пропорційне значення вимірюваної температури ΔT . Так розроблений біметалевий датчик температури дозволяє збільшити чутливість самого вимірювання і має просту та надійну конструкцію.

Було також розроблено ще один біметалевий датчик температури [39], який може використовуватися у ваговимірювальній системі. У складі цього датчика є біметалева пластина, яка деформується та призводить до переміщення магнітного осердя всередині котушки індуктивності, а у біметалевому датчику [40] використовувався конденсатор змінної ємності, сигнали з якого мають пропорційні значення вимірюваної температури. Створена корисна модель належить до вимірювальної техніки і може використовуватися в промислових та побутових приладах для вимірювання температури.

Відомий біметалевий датчик температури, що являє собою навиту із плоскої біметалевої стрічки гвинтову пружину, причому один кінець пружини закріплено нерухомо, а інший механічно зв'язано з рухомим контактом реостатного вимірювального перетворювача [41]. До основних недоліків наведеного вище датчика слід віднести: недостатню надійність через наявність ковзаючого контакту реостатного вимірювального перетворювача, відсутність частотного та цифрового вихідних сигналів.

Найближчим аналогом щодо запропонованої корисної моделі було обрано біметалевий датчик температури, який має пружину, яка хімічно покрита шаром металу з високою електропровідністю, та виконана із плоскої біметалевої стрічки, а також підключена у контур вимірювального LC-автогенератора електричних коливань, з'єднаного з мікроконтролером [38]. До недоліків такого виду датчика необхідно віднести недостатню чутливість і точність вимірювання температури, складність виготовлення біметалевої пружини, відносно велику вартість покриття пружини.

В основі розробки корисної моделі лежить задача підвищення чутливості і точності вимірювання температури, а також спрощення процесу виготовлення датчика. Поставлена задача вирішується таким чином. Біметалевий датчик температури, що містить чутливий елемент, LC-автогенератор електричних коливань і мікроконтролер, чутливий елемент відповідно до корисної моделі являє собою консольно закріплену біметалеву плоску пластину, вільний кінець

якої передавальним механізмом з'єднано з магнітним осердям котушки індуктивності, увімкненої у контур LC-автогенератора електричних коливань. Причому замість біметалевої плоскої пластини можна застосувати і біметалеву пластину, скручену у формі спіралі.

Застосування нових елементів: біметалевої плоскої пластини, передавального механізму, магнітного осердя котушки індуктивності, а також зв'язків між ними (консольно закріплену біметалеву плоску пластину вільним кінцем через передавальний механізм з'єднано з магнітним осердям котушки індуктивності) забезпечує підвищення чутливості й точності вимірювання температури, зменшує складність і вартість виготовлення біметалевої пластини.

На рисунку 4.8 зображено схему біметалевого датчика температури.

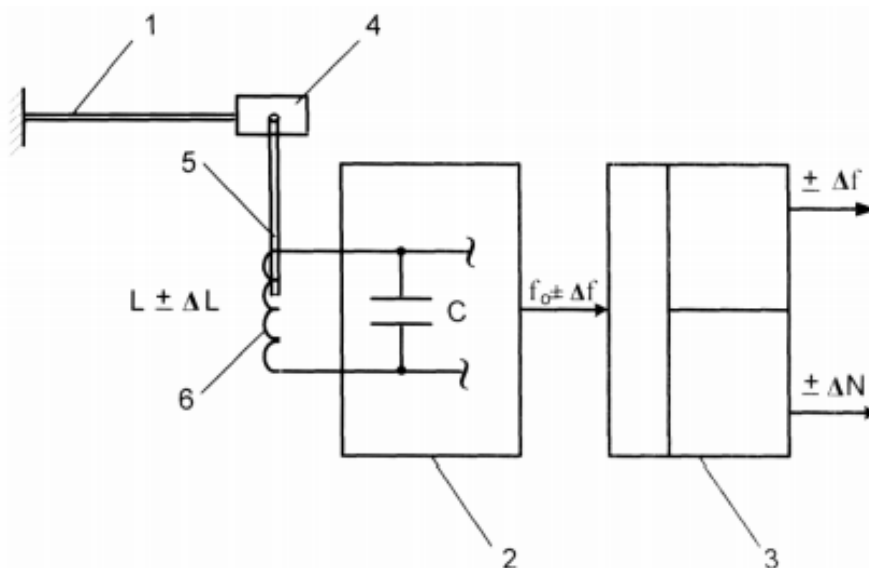


Рисунок 4.8 – Схема біметалевого датчика температури

Біметалевий датчик температури містить чутливий елемент 1, LC-автогенератор електричних коливань 2 і мікроконтролер 3. Чутливий елемент 1 являє собою консольно закріплену біметалеву пластину, вільний кінець якої через передавальний механізм 4 з'єднано з магнітним осердям 5 котушки індуктивності 6. Котушка індуктивності 6 увімкнена у контур LC-автогенератора електричних коливань 2, який з'єднано з мікроконтролером 3.

Датчик працює таким чином. При початковому значенні температури T_0 (наприклад, $T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$) установлюється початкове положення магнітного осердя 5 у котушці індуктивності 6, яка буде мати індуктивність L_0 . При цьому початкове значення частоти $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$ автогенератора електричних коливань 2 надходить на мікроконтролер, який запрограмовано на компенсацію цього значення частоти і формування інформативних параметрів датчика - частоти Δf і цифрового коду ΔN пропорційних значенню вимірюваної температури. Таким чином, на виходах мікроконтролера 3 установлюються початкові значення вихідних сигналів датчика $\Delta f=0$, $\Delta N=0$. Зміна температури на величину ΔT (наприклад, підвищення) призводить до деформації біметалевої пластини 1, вільний кінець якої через передавальний механізм 4 призводить до переміщення магнітного осердя 5 усередині котушки індуктивності 6. Це, своєю чергою, спричиняє зміну індуктивності L_0 на величину ΔL і частоти f_0 автогенератора електричних коливань 2 на величину Δf . Таким чином, на частотному та цифровому виходах мікроконтролера 3 установлюються значення Δf і ΔN , пропорційні значенню вимірюваної температури ΔT .

Запропонований біметалевий датчик температури дозволяє підвищити чутливість і точність вимірювання температури, знизити складність і вартість виготовлення датчика.

Резюме до розділу 4

Четвертий розділ присвячено розробленню ваговимірювальної системи, яка належить до засобів для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу та може застосовуватися у багатьох підприємствах харчової, металургійної та гірничорудної промисловостей. На точність вимірювання системи впливає безліч факторів. Одним з найважливіших факторів є температура. Для підвищення точності вимірювань були запропоновані

волоконно-оптичний датчик вологості й температури, два терморегулятори, два біметалевих датчики температури.

Удосконалено ваговимірювальну систему шляхом уведення до її складу терморегулятора, до якого підключено датчик температури.

Розроблено волоконно-оптичний датчик, що використовується для вимірювання вологості й температури. Для того щоб вилучити взаємне впливання параметрів, що вимірюються, на отримані результати вимірювання і збільшити технологічність виготовлення датчика, були застосовані додаткові елементи, а саме: додатковий світловод з волоконним розгалужувачем, що містить оптичні фільтри у кожній лінії і віддзеркалюючим шаром на його торці, а також і зв'язків між ними.

Розроблено терморегулятор, в якому застосовується біметалевий термометр, що включений між резисторами і дозволяє роботу з термометром зробити безпечною, а також підвищує його надійність. Також було розроблено другий терморегулятор, в якому також використовується біметалевий термометр, що включається паралельно до світлодіода оптопари, дозволяє забезпечити безпечну роботу з самим терморегулятором і підвищити його надійність.

Створено новий біметалевий датчик температури, виконання якого дозволить підвищити його чутливість і у той же час спростить конструкцію самого чутливого елемента. Для цього чутливий елемент являє собою консольно закріплену біметалеву плоску або скручену у формі спіралі пластину. Вільний кінець пластини через передавальний механізм з'єднаний з валом конденсатора змінної ємності, який увімкнений у контур LC-автогенератора електричних коливань. Так розроблений біметалевий датчик температури дозволяє збільшити чутливість самого вимірювання і має просту та надійну конструкцію.

Застосування у ваговимірювальній системі нових елементів і зв'язків між ними дозволило підвищити точність вимірювання вагової витрати матеріалів.

Також було розроблено пристрій для проведення багатofакторного експерименту. При використанні цього пристрою експериментатор має змогу виби-

рати різні варіанти для оптимального плану проведення експерименту, а система, що налаштована на реалізацію цього плану, має змогу послідовно генерувати відповідні значення рівнів факторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ У РОЗДІЛІ 4

1. Харченко А. А. Устройство для проведения многофакторного эксперимента. *Современные научные исследования и инновации*. Май 2014, выпуск №5. - [URL:http://web.snauka.ru/issues/2014/05/32952](http://web.snauka.ru/issues/2014/05/32952).

2. Комп'ютерна програма «Програма формування каталогів оптимальних планів багатфакторного експерименту» /А. А. Харченко. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір № 52996. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 09.01.2014.

3. Ваговимірювальна система: пат. 129696 Україна: МПК G01F 11/02 (2006.01). №U 201804607; заявл. 26.04.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

4. Ваговимірювальна система: пат. 27285 Україна: МПК G01F 11/00 (2006). №U 200706404; заявл. 08.06.2007; опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17.

5. Ваговимірювальна система: пат. 58098 Україна: МПК G01F 11/00 (2011.01). №U 201013004; заявл. 01.11.2010; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6.

6. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Москва: Техносфера, 2008. 520 с.

7. Гавричев В. Д., Дмитриев А. Л. Волоконно-оптические датчики: учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. 79 с.

8. Красюк Б. А., Семенов О. Г., Шереметьев А. Г.Световодные датчики. Москва: Машиностроение, 1990. 256 с.

9. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики; под ред. Т. Окоси. - пер. с япон. Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

10. Бусурин В. И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
11. Udd E. Fiber Optic Smart Structures. *Proceedings of IEEE*. США, 1996. №6. P. 884–894.
12. Tracey P. M. Intrinsic Fiber-Optic Sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1991. № 27. P.965-983.
13. El-Sherif M. A. Smart structures and intelligent systems for health monitoring and diagnostics. *ABBI*. 2005. №. 3-4. P.161-170.
14. Inaudi D., Glisic B. Overview of Fibre Optic Sensing Applications to Structural Health Monitoring. *Symposium on Deformation Measurement and Analysis*. 2008. P. 85-90.
15. Mendez A. Overview of fiber optic sensors for NDT applications. *IV NDT Panamerican Conference*. 2007. P.452-467.
16. Hartog A. H. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers. *Journal Lightwave Technol.* 1983. №1. P.498–509.
17. Dakin J. P., Pratt D. J., Bibby G. W., Ross J. N. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electronics Letter*. 1985. № 21. P. 569–570.
18. Bao X., Webb D. J., Jackson D. A. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber. *Optics Letter*. Kent, UK, 1994. № 19. P.141–143.
19. Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури: пат. 122987 Україна: МПК G02B 6/00; G01N 19/10(2006.01); G01K 5/00. № U 201705818; заявл. 12.06.2017; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.
20. Волоконно-оптичний гігрометр: пат. 79525, Україна: МПК G02B 6/00, МПК G01N 25/56. № U 201212093; заявл. 22.10.2012; опубл. 25.04.2013, бюл. № 8.

21. Волоконно-оптический датчик климат-контролю для вимірювання вологості і температури: пат. 108519, Україна: МПК G02B 6/00, МПК G01N 19/10, G01K 5/00. № U 201306835; заявл.31.05.2013; опубл.12.05.2015, бюл. № 9.
22. Hashemian H.M. Monitoring and measuring I&C performance in nuclear power plants . USA: *International Society of Automation*. 2014. 376 p.
23. Kopesbayeva A.A., Kim E.C. Study and implementation of robust controllers for objects with unknown or incomplete mathematical models. *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi*. Алмата, 2014. № 2 - 25. P. 32-37.
24. Kopesbayeva A. A., Kim E. C. Robust controller based standard function blocks PID_Compact of Tia Portal software by SIEMENS. *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi*. Алмата, 2014. № 4-27. P. 59-65.
25. Карташов Б. А., Привалов А. С., Самойленко В. В., Татамиров Н.И. Компьютерные технологии и микропроцессорные средства в автоматическом управлении. Ростов: Феникс, 2013. 540 с.
26. Оськин С. В., Николаенко С. А., Волошин А. П., Цокур Д. С. Лабораторный практикум по дисциплине «Автоматизация технологических процессов». Краснодар: РИО КубГАУ, 2013. 87 с.
27. Оськин С. В., Овсянников Д. А., Николаенко С.А., Волошин А.П. Компьютерное моделирование систем автоматического управления: практикум Краснодар: РИО КубГАУ, 2010. 43 с.
28. Николаенко С. А., Цокур Д. С. Исследования влияния параметров электроозонирования на выживаемость тест-микроорганизмов. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ)*. Краснодар: КубГАУ, 2014. №09(103). С. 737 – 752.
29. Павлов А. И. Динамическая коррекция коэффициента передачи пропорционально-интегрального регулятора . *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*. Одесса : ОНАПТ, 2015. № 1. Т. 7. С. 31–34.

30. Водічев В. А., Монтік П. М., Алдаїрі Алі. Дослідження динамічних характеристик параметричних систем керування технологічними процесами. *Автоматизация технологических и бизнеспроцессов*. Одесса : ОНАПТ, 2014. № 3 (19). С. 4–7.

31. Павлов А. И. Повышение адекватности имитационных моделей нелинейных диссипативных объектов. *Автоматизация технологических и бизнеспроцессов*. Одесса : ОНАПТ, 2014. № 17. С. 4–7.

32. Терморегулятор в колі змінного струму: пат. № 329, Україна: МПК G05D 23/19. № 98084509; заявл. 20.08.1998; опубл. 03.02.1998, бюл. № 10.

33. Терморегулятор: пат. 106309, Україна: МПК G05D 23/19. № U 201509559; заявл. 05.10.2015; опубл. 25.04.2016, бюл. № 8.

34. Терморегулятор: пат. 121097, Україна: МПК G05D 23/19. № U 201705879; заявл. 12.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22.

35. Терморегулятор: пат. 126339 Україна: МПК G05D 23/19 (2006.01). № U 201801516; заявл. 15.02.2018; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

36. Терморегулятор: пат. 106327, Україна: МПК G05D 23/19. № U 201509601; заявл. 05.10.2015; опубл. 25.04.2016, бюл. № 8.

37. Келим Ю. М. Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации. Москва: Издательский центр «Академия», 2014. 352 с.

38. Біметалевий датчик температури: пат. 55106, Україна: МПК G01K 7/01, G01K 5/00. № U 201004949; заявл. 26.04.2010; опубл. 10.12.2010, бюл. № 23.

39. Біметалевий датчик температури: пат. 129594, Україна: МПК G01K 7/34 (2006.01). № U 201803081; заявл. 26.03.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

40. Біметалевий датчик температури: пат. 128271, Україна: МПК G01K 7/34; G01R 5/00 (2006.01). № U 201803152; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17.

41. Лаврова А.Т. Элементы автоматических приборных устройств: учеб. пособие для вузов. Москва: Машиностроение, 1975. С. 90-93.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності експериментальних досліджень за рахунок розроблення методів оптимізації багаторівневих планів експериментів. Вирішені завдання та наукові результати, які отримані в ході дослідження, дають можливість сформулювати основні висновки дисертаційної роботи:

1. Виконано аналіз існуючих методів, які можна застосовувати для оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними (часовими) витратами.

2. Розроблено метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на перестановці стовпців матриці планування та відповідне програмне забезпечення. Цей метод дає результати близькі до результатів, отриманих методом перестановки рядків матриці планування експерименту. Застосування методу, оснований на використанні перестановки стовпців матриці планування експерименту, ефективно при кількості факторів $2 \leq k \leq 6$. Особливо цей метод ефективний при невеликій кількості факторів, так як у цьому випадку він дає оптимальний варіант при великій швидкодії. У результаті дослідження комплексу технічних систем за допомогою методу перестановок рядків матриці планування експерименту отримано план експерименту, який має вартість реалізації 1284,65 ум. од. А вартість реалізації плану, отриманого за допомогою методу перестановок стовпців матриці планування, становить 1289,3 ум. од. При дослідженні вихорострумкових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях ($k = 4$) методом, оснований на перестановці стовпців матриці планування експерименту, був отриманий план експерименту, який має вартість реалізації 114,25 ум. од., а план, отриманий методом перебору (проаналізовано 7777777 варіантів) - 112,85 ум.од. Таким чином, при дослідженні обраних нами об'єктів можна зробити висновок, що метод на основі перестановки стовпців матриці

планування дає результати, близькі до результатів, отриманих методом випадкового пошуку (перестановки рядків матриці планування), але за менший час завдяки зменшенню необхідних перетворень.

3. Розроблено метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту, оснований на використанні табу-пошуку, та програмне забезпечення, що його реалізує. При пошуку оптимальних комбінаторних планів експерименту ($k = 4$) методом, оснований на застосуванні табу-пошуку, отримано план, який має меншу вартість, ніж план, отриманий методом перестановки рядків матриці планування при аналізі 65576 варіантів. При дослідженні ваговимірювальної системи вартість реалізації отриманого плану дорівнює 110 ум. од. і час рахунку - 0,01 с, а для оптимального плану, отриманого при повному переборі рядків - 102 ум. од. і час рахунку 25 с. Застосування розробленого методу та програмного забезпечення, оснований на використанні оптимізації планів експериментів табу-пошуком, ефективно при кількості факторів $k \geq 3$.

4. Розроблено метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту роєм часток. Було проведено оптимізацію планів багатофакторного експерименту при дослідженні напівпровідникового терморегулятора. Виграш у результатах оптимізації при використанні методу аналізу перестановок менше ($B=1,99$ раз), ніж при методах табу-пошуку ($B=2,53$ раз) і випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування) ($B=2,31$ раз). Найбільші показники виграшу дозволяє отримати метод рою часток ($B=2,61$ раз). Крім цього метод рою часток має найбільші показники швидкодії.

5. Удосконалено ваговимірювальну систему за рахунок уведення таких складових частин, як волоконно-оптичний датчик для вимірювання температури та вологості, біметалевий датчик температури, терморегулятор.

6. Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджені в практику ряду підприємств та організацій.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Харченко А. А. Устройство для проведения многофакторного эксперимента. *Современные научные исследования и инновации*. Май 2014. Вып. 5. - URL:<http://web.snauka.ru/issues/2014/05/32952>.
2. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма случайного поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вып. 70. С. 255-262.
3. Кошевой Н.Д., Беляева А. А. Применение алгоритма табу-поиска для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім.Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 52. С. 116-123.
4. Кошевой Н.Д., Беляева А. А. Применение метода табу-поиска для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. Вып. 73. С.87-93.
5. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода табу-поиска для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2016. Вип. 53. С. 85-91.
6. Кошевой Н.Д., Беляева А.А. Применение метода роя частиц для оптимизации композиционных планов второго порядка. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*: зб. наук. пр. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Вип. 1(81). С. 69-75.
7. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение метода роя частиц для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2017. Вип. 55. С. 46-51.
8. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Применение алгоритма оптимизации ро-ем частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного экспери-

мента. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запорожье: ЗНТУ, 2018. Вып. 1 (44). С. 41-49. (Web of Science)

9. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запорожье: ЗНТУ, 2018. Вып. 4 (47). С. 179-187. (Web of Science)

10. Комп'ютерна програма «Програма формування каталогів оптимальних планів багатфакторного експерименту» /А. А. Харченко. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №52996. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 09.01.2014.

11. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатфакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63466. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 06.01.2016.

12. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатфакторного експерименту з використанням алгоритму випадкового пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63747. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 22.01.2016.

13. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №68266. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

14. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатфакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського

права на твір №68265. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 19.10.2016.

15. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №71243. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

16. Комп'ютерна програма «Програма для оптимізації трьохрівневих планів багатофакторного експерименту з використанням алгоритму рою часток»/А. А. Беляєва, М. Д. Кошовий. - Свід. про реєстрацію авторського права на твір №71242. Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти та науки України 31.03.2017.

17. Терморегулятор: пат. 121097 Україна: МПК G05D 23/19. № U201705879; заявл. 12.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22.

18. Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури: пат. 122987 Україна: МПК G02B 6/00; G01N19/10(2006.01); G01K 5/00. № U 201705818; заявл. 12.06.2017; опубл. 12.02.2018, Бюл. №3.

19. Біметалевий датчик температури: пат. 128271 Україна: МПК G01K 7/34; G01R 5/00 (2006.01). №U 201803152; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17.

20. Терморегулятор: пат. 126339 Україна: МПК G05D 23/19 (2006.01). № U 201801516; заявл. 15.02.2018; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

21. Біметалевий датчик температури: пат. 129594 Україна: МПК G01K 7/34 (2006.01). №U 201803081; заявл. 26.03.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. №21.

22. Ваговимірювальна система: пат. 129696 Україна: МПК G01F 11/02 (2006.01). № U 201804607; заявл. 26.04.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

23. Харченко А. А. Оптимальные планы многофакторного эксперимента. *Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении*: тез.докладов Харьков:ХАИ, 2014. – С. 41.

24. Кошовий М. Д., Беляєва А. А. Дослідження режимів роботи оператора радіолокаційної системи (РЛС). *Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє»* /за заг. редакцією В. В. Балабіна. – Київ:ВІКНУ, 2016. С. 52.

25. Кошовий Н. Д., Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторного эксперимента. *Тезисы докладов XIV Международного научно-технического семинара «Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (UM-2017)»*. Болгария, Созополь, 2017. С. 58.

26. Беляева А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании терморегулятора. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017»*: збірник матеріалів конференції. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2017. Том 2. С. 106.

27. Беляева А. А. Оптимизация планов экспериментов для исследования процесса термической обработки пористого материала. *Одинадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси (ІРТК-2018)»* :зб. тез. Київ: НАУ, 2018. С. 214-216.

28. Кошевой Н. Д., Беляева А. А. Исследование прибора для измерений влажности сыпучих материалов. *XV Международный научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты (UM-2018)»* : тез. докладов. Болгария, Созополь, изд. «Софттрейд», 2018. С. 22.

29. Koshevoy N. D., Beliaieva A. A., Rozhnova T.G. Optimal planning methods for measurements in limited material resources conditions. *28th International scientific symposium «Metrology and metrology assurance 2018»*: Proceedings - Technical University of Sofia Publishing house of the Technical University of Sofia, Prepress Softtrade, 130 Issues–September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria. P. 327-330.

30. Беляєва А. А. Оптимізація технологічних процесів виробництва електронних пристроїв. *Міжнародний науковий симпозіум «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РІШЕННЯ»*. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці міжнар. наук.-практ. конф., 15 - 20 квітня 2019 р., Ужгород : ДВНЗ «Ужгородський національний університет». С. 161-162.

ДОДАТОК Б

Авторські свідоцтва на програмний продукт

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 52996

**Комп'ютерна програма "ПРОГРАМА ФОРМУВАННЯ КАТАЛОГІВ
ОПТИМАЛЬНИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ"**
(вид, назва твору)

Автор(и) Харченко Анна Андріївна
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 09.01.2014

Голова Державної служби інтелектуальної власності України
М.В. Ковіня



Kolyn

УКРАЇНА



• УКРАЇНА • **ДЕРЖАВНА СЛУЖБА** • **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ** • **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ** • УКРАЇНА •

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 63747

Комп'ютерна програма "Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатофакторного експерименту з використанням алгоритму випадкового пошуку"

(вид, назва твору)

Автор(и) Белісва Анна Андріївна, Кошовий Микола Дмитрович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 22.01.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України


А.Г. Жарінова

• УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • UKRAINE • UKRAINE • UKRAINE • UKRAINE •

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 63466

Комп'ютерна програма "Програма розрахунку мінімальної вартості проведення багатфакторного експерименту з використанням алгоритму табу-пошуку"

(вид, назва твору)

Автор(и) Беляєва Анна Андріївна, Кошовий Микола Дмитрович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 06.01.2016

Голова Державної служби інтелектуальної власності України

А.Г. Жарінова



УКРАЇНА



• ДЕРЖАВНА СЛУЖБА • ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ •

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 68265

Комп'ютерна програма "ПРОГРАМА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ
ТРЬОХРІВНЕВИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ З
ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМУ ТАБУ-ПОШУКУ"

(вид, назва твору)

Автор(и) Беляєва Анна Андріївна, Кошовий Микола Дмитрович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 19.10.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
 Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА



УКРАЇНА • ДЕРЖАВНА СЛУЖБА • ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ • УКРАЇНА

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 68266

Комп'ютерна програма "ПРОГРАМА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ
КОМПОЗИЦІЙНИХ ПЛАНІВ ДРУГОГО ПОРЯДКУ З ВИКОРИСТАННЯМ
АЛГОРИТМУ ТАБУ-ПОШУКУ"

(вид, назва твору)

Автор(и) Белясва Анна Андріївна, Кошовий Микола Дмитрович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 19.10.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.с. Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 71242

Комп'ютерна програма "Програма для оптимізації трьохрівневих планів
багатофакторного експерименту з використанням алгоритму рою часток"
(вид, назва твору)

Автор(и) Беляєва Анна Андріївна, Кошовий Микола Дмитрович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 31.03.2017





Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.О. Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 71243

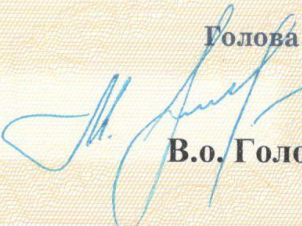
**Комп'ютерна програма "Програма для оптимізації композиційних планів
другого порядку з використанням алгоритму рою часток"**
(вид, назва твору)

Автор(и) Беляєва Анна Андріївна, Кошовий Микола Дмитрович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 31.03.2017



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.о. Голови А.А. Малиш

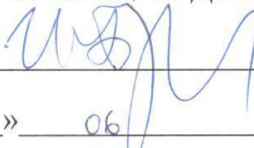


ДОДАТОК В

Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Керуючий санацією ДП ХПЗ ім.Т.Г.Шевченка


 « 28 » 06 2019 р.
 І.В.Булижин
 АКТ



про впровадження результатів кандидатської дисертації

Беляєвої Анни Андріївни

Науково-технічна комісія у складі : начальник дослідно-конструкторського бюро Биков Ю.В., начальник відділу електроніки Нечаєв В.Ю., заступник начальника конструкторського відділу Жуковін С.В. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи:

- терморегулятори (патенти України № 121097 , № 126339), в яких застосування біметалевих термометрів, включених між резисторами, дозволило зробити роботу з пристроями безпечною, а також підвищити їх надійність;
- біметалеві датчики температури (патенти України № 129594, № 128271), які дозволяють підвищити чутливість та точність вимірювання температури, знизити складність і вартість виготовлення датчика

використовувалися в науково-дослідних роботах, що проводяться ДП ХПЗ ім.Т.Г.Шевченко.

Впровадження наведених результатів дозволило вирішити ряд задач, пов'язаних з проектуванням систем контролю та управління бронетанковою технікою.

Начальник дослідно-конструкторського бюро

Начальник відділу електроніки

Заступник начальника

конструкторського відділу



Ю.В.Биков



В.Ю.Нечаєв



С.В.Жуковін

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи

Національного аерокосмічного університета

ім.М.Є.Жуковського «ХАІ»

професор _____ Павленко В.М.

« 30 » _____ 2019 р.



АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертації

Беляєвої Анни Андріївни

Ми, що нижє підписалися, заступник завідуючого кафедрою інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, к.т.н., доцент Потильчак О.П., керівник приладового циклу, к.т.н., доцент Савельєв А.С., к.т.н., доцент Михайлов А.Г., к.т.н., доцент Дергачов В.А., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Беляєвої А.А. впроваджені в навчальний процес кафедри №303, а саме:

- запропоновані біметалеві датчики температури (патенти України № 129594, № 128271) застосовуються у поставленому курсі «Вимірювальні перетворювачі», що викладається професором Кошовим М.Д.;

- розроблені методи побудови оптимальних планів багатofакторного експерименту на основі алгоритмів випадкового пошуку (перестановки стовпців матриці планування), табу-пошука, роя часток і відповідне програмне забезпечення, що реалізує ці методи, а також результати оптимізації використовуються у поставленому курсі «Теорія планування експерименту», що викладається доцентом Михайловим А.Г.

Заступник завідуючого кафедрою
інтелектуальних вимірювальних систем
та інженерії якості
Керівник приладового циклу
Доцент каф.303
Доцент каф.303

О.П.Потильчак
А.С. Савельєв
А.Г.Михайлов
В.А.Дергачов

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ПАТ «Авіаконтроль»

М.М.Дубовський

« 2 » 2019 р.



АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертації

Беляєвої Анни Андріївни

Науково-технічна комісія у складі : заступник головного конструктора В.М.Єлізєв, головний електронік О.С.Гапоненков, начальник сектора О.Н.Скляр склали цей акт про те, що наступні результати дисертаційної роботи:

- волоконно-оптичний датчик вологості і температури (патент України №122987), в якому додавання ще одного світловоду призводить до вилучення взаємного впливу вимірюємих параметрів на кінцеві результати. Використання і розміщення прямолінійних відрізків світловодів призводить до підвищення технологічності виготовлення волоконно-оптичного датчика;

- терморегулятори (патенти України № 121097 , № 126339), в яких було запропоновано використання біметалевих термометрів, включених між резисторами, що дозволило зробити роботу оператора з пристроями безпечною, а також підвищити їх надійність

використані в науково-дослідних роботах, що виконуються ПАТ «Авіаконтроль».

Впровадження наведених результатів дозволило вирішити ряд задач, пов'язаних з проектуванням систем контролю та моделювання процесів виробництва авіаційної техніки.

Заступник головного конструктора

Головний електронік

Начальник сектора

В.М.Єлізєв

О.С.Гапоненков

О.Н.Скляр

ДОДАТОК Г

Патенти на корисні моделі



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **121097** (13) **U**
(51) МПК
G05D 23/19 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	и 2017 05879	(72) Винахідник(и):	Кошовий Микола Дмитрович (UA), Дергачов Володимир Андрійович (UA), Кошова Ірина Іванівна (UA), Костенко Олена Михайлівна (UA), Беляєва Анна Андріївна (UA)
(22) Дата подання заявки:	12.06.2017	(73) Власник(и):	НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.Є. ЖУКОВСЬКОГО "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ", вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	27.11.2017		
(46) Публікація відомостей про видану патенту:	27.11.2017, Бюл.№ 22		

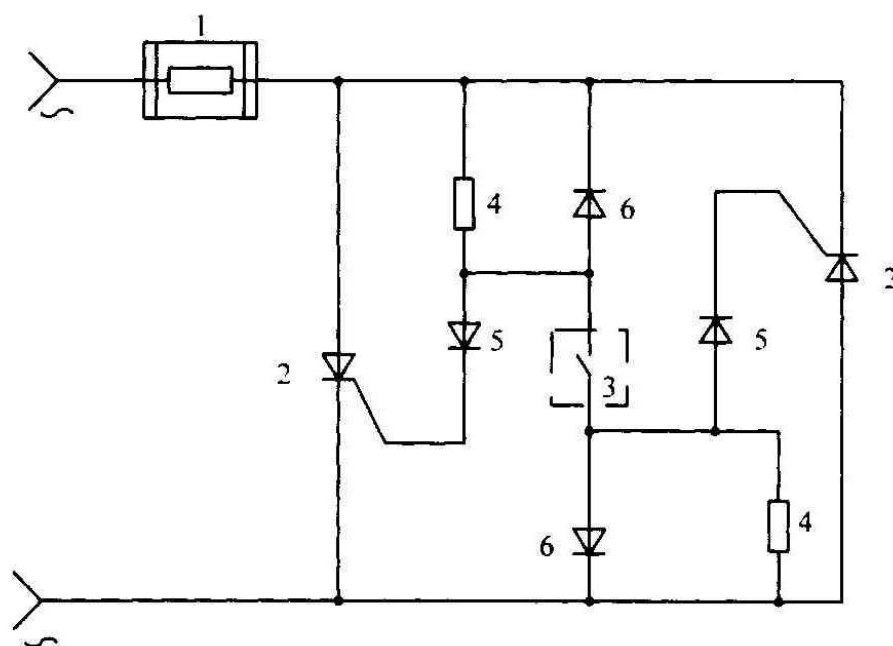
(54) ТЕРМОРЕГУЛЯТОР

(57) Реферат:

Терморегулятор містить нагрівач, два зустрічно-паралельно включених тиристори, резистори в колі керуючих електродів, паралельно яким підключені діоди, що своїми катодами з'єднані з катодами тиристорів, послідовно з резисторами анодами відключені діоди, а їх катода з'єднані з керуючими електродами тиристорів. Між резисторами включено біметалевий термометр.

UA 121097 U

UA 121097 U



UA 121097 U

Корисна модель належить до галузі приладобудування і може бути застосована для термостатів та іншого технологічного обладнання, де потрібне автоматичне підтримання сталої температури.

Відомий терморегулятор в колі змінного струму що містить нагрівач, тиристор як виконавчий елемент, резистор в колі керуючого електрода і датчик, термометричний ртутний датчик у вигляді капілярної трубки із ртуттю ввімкнено між керуючим електродом і катодом тиристора, паралельно зустрічно тиристорі ввімкнено діод з вимикачем в його колі [Пат. України № 329, МПК G05D 23/19, опубл. 03.02.1998, бюл. № 10].

Недоліком такого пристрою є те, що він регулює тільки половину потужності нагрівача і для переходу від половинного до повного діапазону регулювання вимагає ручного керування вимикачем.

Найбільш близьким до запропонованого є терморегулятор, що містить нагрівач, два зустрічно-паралельно включених тиристори, резистори в колі керуючих електродів і термометричний ртутний датчик у вигляді капілярної трубки з ртуттю, причому датчик ввімкнено між резисторами, а в точці з'єднання підключено анодами по два діоди, катоди яких приєднано один до керуючого електрода тиристора, а другий до катода зустрічно-паралельних тиристорів [Пат. України № 106309, МПК G05D 23/19, опубл. 25.04.2016, бюл. № 8].

Недоліками такого пристрою є небезпечність роботи з термометричним ртутним датчиком у вигляді капілярної трубки з ртуттю і недостатня надійність, обумовлена наявністю такого датчика.

В основу корисної моделі поставлено задачу забезпечення безпечної роботи з терморегулятором і підвищення його надійності.

Для досягнення визначеної мети у терморегуляторі, що містить нагрівач, два зустрічно-паралельно включених тиристори, резистори в колі керуючих електродів, паралельно яким підключені діоди, що своїми катодами з'єднані з катодами тиристорів, послідовно з резисторами анодами підключені діоди, а їх катоди з'єднані з керуючими електродами тиристорів, згідно з корисною моделлю між резисторами включено біметалевий термометр.

Застосування біметалевого термометра, включеного між резисторами, забезпечує безпечну роботу з термометром і підвищує його надійність. На кресленні зображена принципова електрична схема пристрою.

Терморегулятор містить нагрівач 1 і два зустрічно паралельно включених тиристори 2. Біметалевий термометр 3 ввімкнено між резисторами 4, які другими виводами підключені до анодів відповідних тиристорів 2. До точок з'єднання біметалевого термометра 3 з резисторами 4 підключено анодами по два діоди 5 і 6, катоди яких приєднано відповідно діод 5 до керуючого електрода, а діод 6 до анода зустрічно паралельних тиристорів 2.

Терморегулятор працює наступним чином.

У вихідному стані положення контакту біметалевого термометра 3 розімкнуте. При цьому в кожний напівперіод струм керування протікає через один з резисторів 4 і діод 5 і відкриває відповідний тиристор 2, що забезпечує протікання струму навантаження через нагрівач 1.

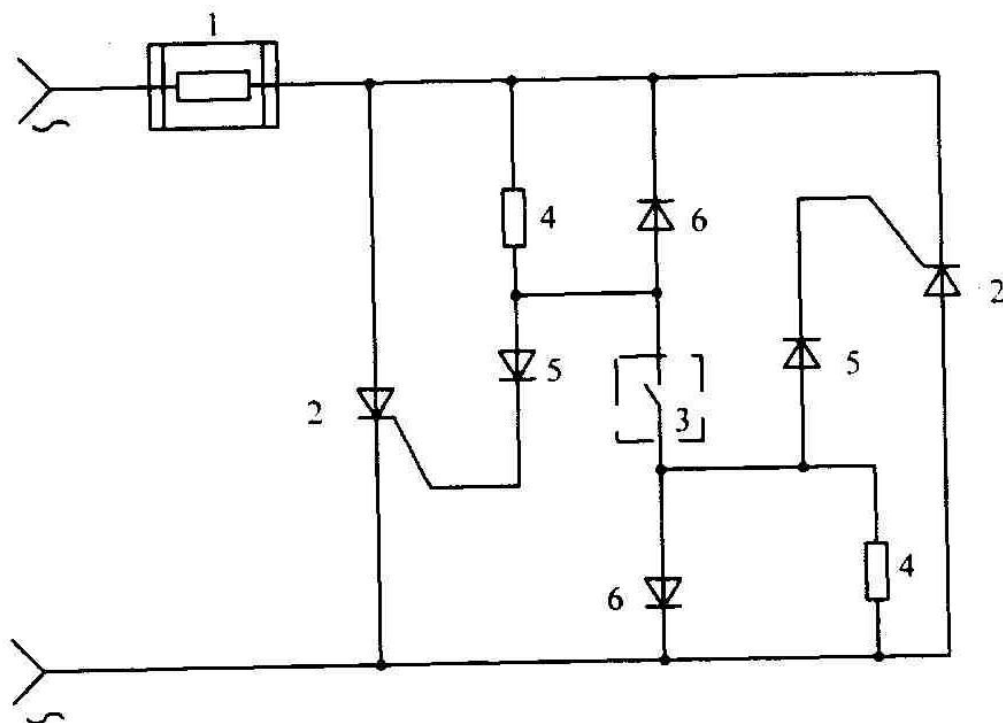
При підвищенні температури в контрольній точці біметалева пластина вигинається і замикає контакти виводів термометра 3. При цьому шунтуються в кожний напівперіод через контакт термометра 3 і один з діодів 6 напівпровідниковий перехід керування відповідних зустрічно-паралельних тиристорів 2, які запираються і знеструмлюють навантаження нагрівача 1.

Таким чином, застосування біметалевого термометра, включеного між резисторами, забезпечує безпечну роботу з терморегулятором і підвищує його надійність.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Терморегулятор, що містить нагрівач, два зустрічно-паралельно включених тиристори, резистори в колі керуючих електродів, паралельно яким підключені діоди, що своїми катодами з'єднані з катодами тиристорів, послідовно з резисторами анодами відключені діоди, а їх катоди з'єднані з керуючими електродами тиристорів, який відрізняється тим, що між резисторами включено біметалевий термометр.

UA 121097 U



Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **122987** (13) **U**

(51) МПК (2017.01)

G02B 6/00**G01N 19/10** (2006.01)**G01K 5/00**

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2017 05818**
 (22) Дата подання заявки: **12.06.2017**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.02.2018**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.02.2018, Бюл. № 3**

(72) Винахідник(и):
**Кошовий Микола Дмитрович (UA),
 Дергачов Володимир Андрійович (UA),
 Кошова Ірина Іванівна (UA),
 Костенко Олена Михайлівна (UA),
 Беляєва Анна Андріївна (UA)**

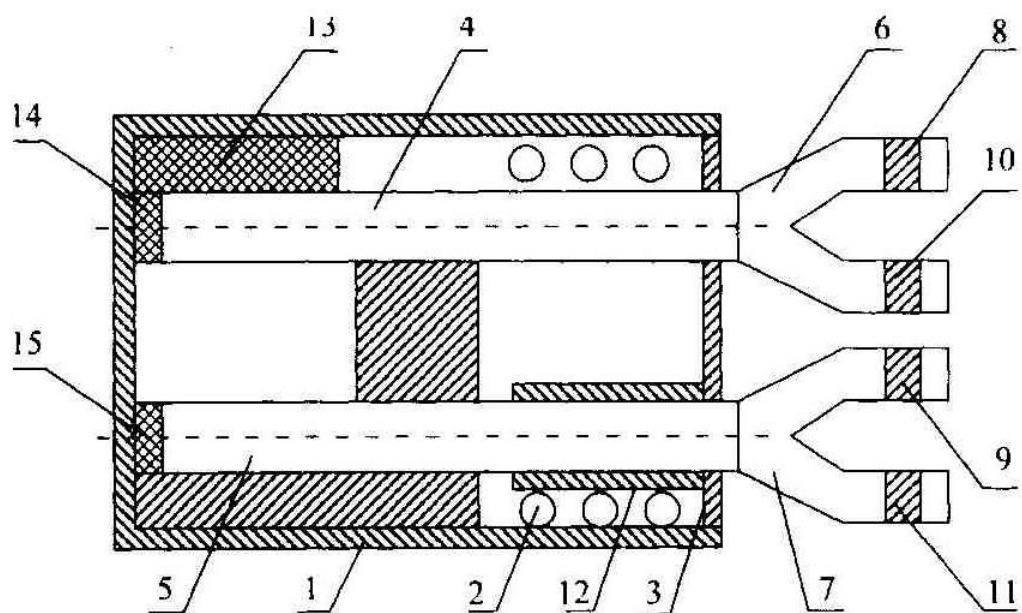
(73) Власник(и):
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ
 УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.Є. ЖУКОВСЬКОГО
 "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ",
 вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070 (UA)**

(54) ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ І ТЕМПЕРАТУРИ**(57) Реферат:**

Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури складається з перфорованої колби з кварцового скла, до якої прикріплені взаємно зварені заглушка, основний світловод з волоконним розгалужувачем з оптичними фільтрами у кожній лінії, мідної трубки, блока гігроскопічного матеріалу та віддзеркалюючого шару на торці світловоду. Через заглушку проходить аналогічний основному додатковий світловод, мідна трубка розташована коаксіально додатковому світловоду, блок гігроскопічного матеріалу розміщено між основним світловодом та колбою.

UA 122987 U

UA 122987 U



UA 122987 U

Корисна модель належить до галузі приладобудування і може застосовуватися для вимірювання вологості і температури.

Відомий волоконно-оптичний датчик клімат-контролю, що складається з основи з кварцового скла, до якої приварений відрізок перфорованої скляної трубки, віддзеркалюючого шару, утвореного на основі, блока гігроскопічного матеріалу, розташованого між віддзеркалюючим шаром та спіральною ділянкою основного світловоду, основного світловоду, перша пряма ділянка якого нероз'ємно та коаксіально до скляної трубки прикріплена до віддзеркалюючого шару, спіральна ділянка розташована концентрично до скляної трубки, а до другої прямої ділянки якого прикріплено біметалеву пластинку, та скляної заглушки між світловодом та трубкою (Патент України № 79525, МПК G02B 6/00, G01N 25/56, опубл. 25.04.2013, бюл. № 8).

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням спіральної ділянки світловоду та біметалевої пластини:

необхідність постійної корекції мікронеідентичностей деформації та старіння елементів спіралі;

неможливість компенсації деградаційних процесів, що плінуть з різною швидкістю, на вільному боці світловоду та на боці, до якого приварена біметалева пластинка.

Найбільш близьким аналогом до запропонованого є волоконно-оптичний датчик клімат-контролю для вимірювання вологості і температури, що складається з перфорованої колби з кварцового скла, до якої прикріплені взаємно зварені заглушка, основний світловод, до якого та від якого крізь волоконний розгалужувач з оптичними фільтрами у кожній лінії надходить та відводиться випромінювання, та мідна трубка, розташована коаксіально до світловоду, первинної гілки світловоду, вторинної гілки світловоду, блока гігроскопічного матеріалу, розташованого між вторинною гілкою світловоду та колбою, та віддзеркалюючого шару, утвореного на торці вторинної гілки світловоду, причому первинна і вторинна гілки встановлені з можливістю зміни радіуса згину між ними, а мідну трубку приварено до основного світловоду (Патент України № 108519, МПК G02B 6/00, G01N 19/10, G01K 5/00, опубл. 12.05.2015, бюл. № 9).

Недоліки датчика, які обумовлені наявністю одного каналу вимірювання вологості і температури:

взаємний вплив вимірювальних параметрів на результати вимірювання, що знижує їх точність;

низька технологічність виготовлення датчика із-за необхідності згину світловоду і його закріплення в такому положенні.

В основу корисної моделі поставлено задачу вилучити взаємний вплив вимірюємих параметрів на результати вимірювання та підвищити технологічність виготовлення датчика.

Поставлена задача вирішується тим, що у волоконно-оптичному датчику для вимірювання вологості і температури, що складається з перфорованої колби з кварцового скла, до якої прикріплені взаємно зварені заглушка, основний світловод з волоконним розгалужувачем з оптичними фільтрами у кожній лінії, мідної трубки, блока гігроскопічного матеріалу та віддзеркалюючого шару на торці світловоду, згідно з корисною моделлю, через заглушку проходить аналогічний основному додатковий світловод, мідна трубка розташована коаксіально додатковому світловоду, блок гігроскопічного матеріалу розміщено між основним світловодом та колбою.

Застосування додаткових елементів (додатковий світловод з волоконним розгалужувачем з оптичними фільтрами у кожній лінії і віддзеркалюючим шаром на його торці) і зв'язків між ними дозволяє вилучити взаємний вплив вимірюємих параметрів на результати вимірювання та підвищити технологічність виготовлення датчика.

На кресленні представлена конструкція волоконно-оптичного датчика для вимірювання вологості і температури.

Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури містить колбу 1 з кварцового скла з отворами перфорації 2, заглушку 3, до якої за допомогою плазменного зварювання приєднано основний 4 і додатковий 5 світловоди з волоконними розгалужувачами 6, 7 з вхідними 8, 9 та вихідними 10, 11 оптичними фільтрами, мідну трубку 12, яка коаксіально розташована до додаткового світловоду 5 і приварена до нього, блок гігроскопічного матеріалу 13, розташований між поверхнею колби 1 та основним світловодом 4. На торцях світловодів 4, 5 утворені віддзеркалюючі шари 14, 15.

Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури працює наступним чином.

При зміні вологості контрольованого середовища відбувається зміна об'єму блока 13 з гігроскопічного матеріалу. Унаслідок чого відбуваються зміни лінійних розмірів як блока, так і

UA 122987 U

величини прогину світловоду 4. Таким чином, у основному світловоді 4 здійснюється порушення умов повного внутрішнього відбивання світла.

Порушення умов повного відбивання світла у основному світловоді 4 знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності світлового випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару 14. Величина зареєстрованого на виході оптичного фільтра 10 волоконного розгалужувача 6 випромінювання є пропорційною до величини контрольованої вологості.

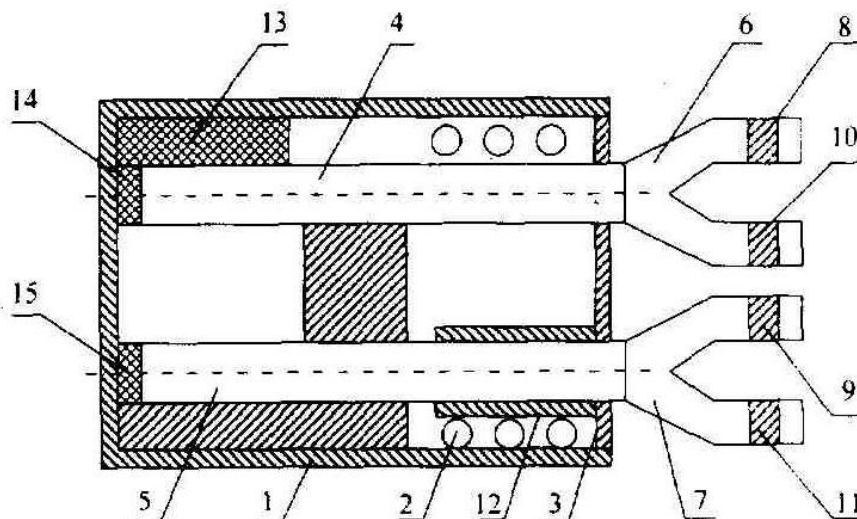
При зміні температури контрольованого середовища відбувається теплове розширення мідної трубки 12, звареної з додатковим світловодом 5. Зміна геометрії трубки викликає зміну геометрії світловоду 5, що приводить до втрат потужності оптичного випромінювання. Величина зареєстрованого на виході оптичного фільтра 11 волоконного розгалужувача 7 випромінювання є пропорційною до величини зміни температури.

Таким чином, введення додаткового світловоду для вимірювання температури контрольованого середовища дозволяє вилучити взаємний вплив вимірюємих параметрів на результати вимірювання, так як вологість і температура вимірюються окремими незалежними каналами.

Підвищується також технологічність виготовлення датчика за рахунок використання і розміщення прямолінійних ділянок світловодів.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури, що складається з перфорованої колби з кварцового скла, до якої прикріплені взаємно зварені заглушка, основний світловод з волоконним розгалужувачем з оптичними фільтрами у кожній лінії, мідної трубки, блока гігроскопічного матеріалу та віддзеркалюючого шару на торці світловоду, який відрізняється тим, що через заглушку проходить аналогічний основному додатковий світловод, мідна трубка розташована коаксіально додатковому світловоду, блок гігроскопічного матеріалу розміщено між основним світловодом та колбою.



Комп'ютерна верстка А. Крулевський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **128271** (13) **U**
 (51) МПК (2018.01)
G01K 7/34 (2006.01)
G01R 5/00

МІНІСТЕРСТВО
 ЕКОНОМІЧНОГО
 РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 03152	(72) Винахідник(и):
(22) Дата подання заявки: 26.03.2018	Кошовий Микола Дмитрович (UA),
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.09.2018	Беляєва Анна Андріївна (UA), Дергачов Володимир Андрійович (UA), Костенко Олена Михайлівна (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.09.2018, Бюл.№ 17	(73) Власник(и):
	НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.Є. ЖУКОВСЬКОГО "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ", вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070 (UA)

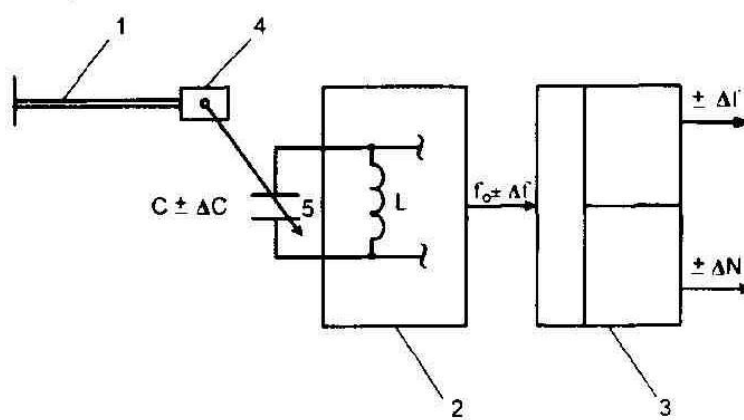
(54) БІМЕТАЛЕВИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ

(57) Реферат:

Біметалевий датчик температури містить чутливий елемент, LC-автогенератор електричних коливань, під'єднаний до мікроконтролера з аналого-цифровим перетворювачем. При цьому чутливий елемент являє собою консольно закріплену біметалеву плоску або скручену у формі спіралі пластину, вільний кінець якої передавальним механізмом з'єднаний з валом конденсатора змінної ємності, увімкненого у контур LC-автогенератора електричних коливань.

U
128271
U

UA 128271 U



UA 128271 U

Корисна модель належить до вимірювальної техніки і може бути використана в промислових та побутових приладах для вимірювання температури.

Відомий біметалевий датчик температури, який містить чутливий елемент у вигляді пружини із плоскої біметалевої стрічки, причому пружина покрита шаром металу з високою електропровідністю і підключена в контур вимірювального LC-генератора електричних коливань, до якого підключено мікроконтролер з аналого-цифровим перетворювачем (патент України №55106, МПК G01K 7/01, G01K 5/00, бюл. № 23, 2010 р.).

До недоліків такого датчика температури слід віднести низьку чутливість і точність вимірювання; складність та відносно велику вартість виготовлення пружини.

Найбільш близьким до запропонованого є біметалевий датчик температури, що містить чутливий елемент у вигляді конденсатора, обкладки якого виконані з плоских біметалевих пластин, відокремлені одна від одної шаром діелектрика і орієнтовані одна до одної сторонами, виконаними з одного металу. Чутливий елемент увімкнений у контур LC-автогенератора електричних коливань, до якого підключено мікроконтролер з аналого-цифровим перетворювачем (патент України №101576, МПК G01K 7/34, G01R 5/00, бюл. № 7, 2013 р.). До недоліків такого датчика температури слід віднести недостатню чутливість вимірювання; складність конструкції виготовлення чутливого елемента.

В основу корисної моделі поставлено задачу створити біметалевий датчик температури, виконання якого дозволить підвищити його чутливість та спростити конструкцію чутливого елемента.

Для вирішення поставленої задачі у біметалевому датчику температури, що містить чутливий елемент, LC-автогенератор електричних коливань, під'єднаний до мікроконтролера з аналого-цифровим перетворювачем, згідно з корисною моделлю, чутливий елемент являє собою консольно закріплену біметалеву плоску або скручену у формі спіралі пластину, вільний кінець якої передавальним механізмом з'єднаний з валом конденсатора змінної ємності, увімкненого у контур LC-автогенератора електричних коливань.

Застосування нових елементів (конденсатор змінної ємності, передавальний механізм, біметалева плоска пластина) та зв'язків між ними (вал конденсатора змінної ємності передавальним механізмом з'єднаний з вільним кінцем консольно закріпленої біметалевої пластини) дозволило підвищити чутливість вимірювання температури і спростити складність конструкції та виготовлення чутливого елемента.

На кресленні схематично представлений біметалевий датчик температури, що пропонується.

Біметалевий датчик температури містить чутливий елемент 1, LC-автогенератор електричних коливань 2 та мікроконтролер з аналого-цифровим перетворювачем 3. Чутливий елемент 1 виконаний у вигляді консольно закріпленої біметалевої плоскої пластини, вільний кінець якої передавальним механізмом 4 з'єднаний з валом конденсатора змінної ємності 5, увімкненого у контур LC-автогенератора електричних коливань 3. Причому чутливий елемент 1 може бути виконаним і у вигляді біметалевої пластини, скрученої у формі спіралі.

Запропонований біметалевий датчик температури працює наступним чином.

При початковому значенні температури середовища (наприклад, $T_0 = 0^\circ\text{C}$) вал конденсатора змінної ємності 5 займає положення, яке буде відповідати ємності конденсатора C_0 . При цьому початкове значення частоти LC-автогенератора електричних коливань

$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$ надходить до мікроконтролера 3, який запрограмований на компенсацію цього

значення частоти і формування параметрів датчика частоти Δf і цифрового коду ΔN , пропорційних значенню вимірюваної температури. Таким чином, на виходах мікроконтролера 3 встановлюються початкові значення вихідних сигналів датчика $\Delta f = 0$ і $\Delta N = 0$. Зміна температури на величину ΔT (наприклад, підвищення) призводить до деформації біметалевої

плоскої пластини на величину $F = k_{\text{пр}} \frac{\Delta T}{d \cdot 10^4}$ у мм, а для пластини, скрученої у формі спіралі,

$F = k_{\text{пр}} \frac{2\Delta T^2}{d \cdot 10^4}$ у мм, де $k_{\text{пр}}$ - коефіцієнт прогину на 1°C , ΔT - приріст температури $^\circ\text{C}$, l -

довжина біметалу у мм, d - грубізна біметалу у мм. Прогин біметалевої пластини 1 призводить до повороту через передавальний механізм 4 вала конденсатора змінної ємності 5, що, в свою чергу, викликає зміну ємності C_0 на ΔC і частоти f_0 на Δf . В цьому випадку на частотному та

UA 128271 U

цифровому виходах мікроконтролера 3 встановлюються значення частоти Δf і цифрового коду ΔN , пропорційні значенню вимірюваної температури ΔT .

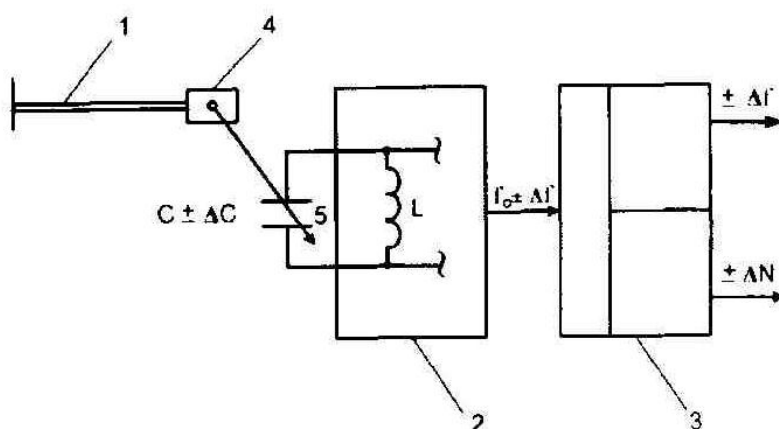
Таким чином, запропонований біметалевий датчик температури дозволяє підвищити чутливість вимірювання та має просту і надійну конструкцію.

5

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Біметалевий датчик температури, що містить чутливий елемент, LC-автогенератор електричних коливань, під'єднаний до мікроконтролера з аналого-цифровим перетворювачем, який відрізняється тим, що чутливий елемент являє собою консольно закріплену біметалеву пласку або скручену у формі спіралі пластину, вільний кінець якої передавальним механізмом з'єднаний з валом конденсатора змінної ємності, увімкненого у контур LC-автогенератора електричних коливань.

10



Комп'ютерна верстка В. Мацело

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **126339** (13) **U**
(51) МПК
G05D 23/19 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 01516	(72) Винахідник(и): Кошовий Микола Дмитрович (UA), Беляєва Анна Андріївна (UA), Костенко Олена Михайлівна (UA)
(22) Дата подання заявки: 15.02.2018	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 11.06.2018	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.С. ЖУКОВСЬКОГО "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ", вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070 (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 11.06.2018, Бюл.№ 11	

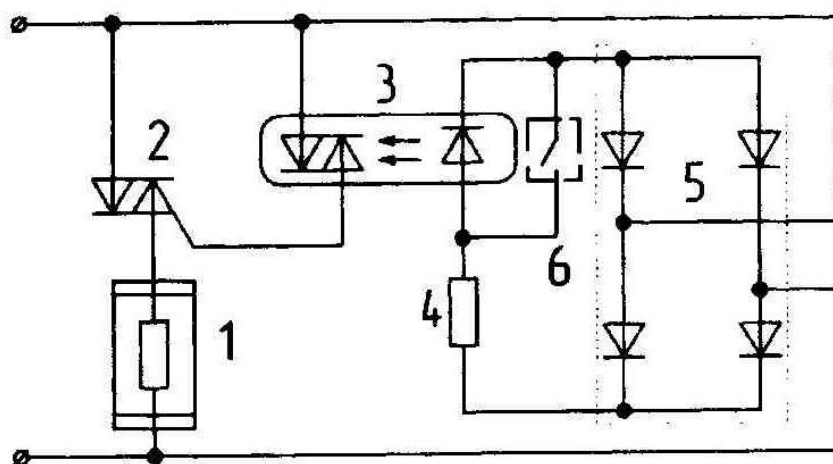
(54) ТЕРМОРЕГУЛЯТОР

(57) Реферат:

Терморегулятор містить послідовно з'єднані нагрівач і симістор як виконавчий елемент. В коло керуючого електрода симістора включений вихідний симістор оптопари, світлодіод якої через резистор і діодний міст ввімкнений на напругу мережі. Крім цього паралельно світлодіоду включено біметалевий термометр.

UA 126339 U

UA 126339 U



UA 126339 U

Корисна модель належить до галузі приладобудування і може бути застосована для термостатів та інших пристроїв, де потрібне автоматичне підтримання сталої температури.

Відомий терморегулятор в колі змінного струму, що містить нагрівач, тиристор як виконавчий елемент, резистор в колі керуючого електрода і датчик, термометричний ртутний датчик у вигляді капілярної трубки із ртуттю ввімкнено між керуючим електродом і катодом тиристора, паралельно зустрічно тиристор у ввімкнено діод з вимикачем в його колі [Пат. України № 329, МПК G05D 23/19, опубл. 03.02.1998, бюл. № 10].

Недоліками такого пристрою є те, що він регулює тільки половину потужності нагрівача і для переходу від половинного до повного діапазону регулювання вимагає ручного керування вимикачем, наявність ртутного датчика зумовлює небезпечність роботи з ним і недостатню надійність.

Найбільш близьким до запропонованого є терморегулятор, що містить нагрівач, симістор як виконавчий елемент, оптоелектронний ключ в колі керуючого електрода, резистор в колі світлодіода оптопари з діодним мостом і термометричний ртутний датчик у вигляді капілярної трубки із ртуттю. Термометричний ртутний датчик приєднано паралельно світлодіоду оптопари [Пат. України № 106327, МПК G05D 23/19, опубл. 25.04.2016, бюл. № 8].

Недоліками такого пристрою є небезпечність роботи з термометричним ртутним датчиком у вигляді капілярної трубки з ртуттю і недостатня надійність, обумовлена наявністю такого датчика.

В основу корисної моделі поставлено задачу отримання безпечної роботи з терморегулятором і підвищення його надійності.

Для вирішення поставленої задачі у терморегуляторі, що містить послідовно з'єднані нагрівач і симістор як виконавчий елемент, в коло керуючого електрода симістора включений вихідний симістор оптопари, світлодіод якої через резистор і діодний міст ввімкнений на напругу мережі, згідно з корисною моделлю, паралельно світлодіоду включено біметалевий термометр.

Застосування біметалевого термометра, включеного паралельно світлодіоду оптопари, забезпечує безпечну роботу з термометром і підвищує надійність терморегулятора

На кресленні зображена принципова електрична схема пристрою.

Терморегулятор містить нагрівач 1 і симістор 2, ввімкнені послідовно. В коло керуючого електрода симістора 2 ввімкнено вихідний симістор оптопари 3, вхідний світлодіод оптопари 3 через резистор 4 і діодний міст 5 ввімкнено на напругу мережі. Паралельно світлодіоду оптопари 3 приєднано біметалевий термометр 6.

Терморегулятор працює наступним чином.

При температурі, нижче заданої, контакти біметалевого термометра 6 розімкнуті. Через світлодіод оптопари 3 протікає струм керування, вихідний симістор оптопари 3 відкритий, а також відкритий і симістор 2, струм проходить через нагрівач 1.

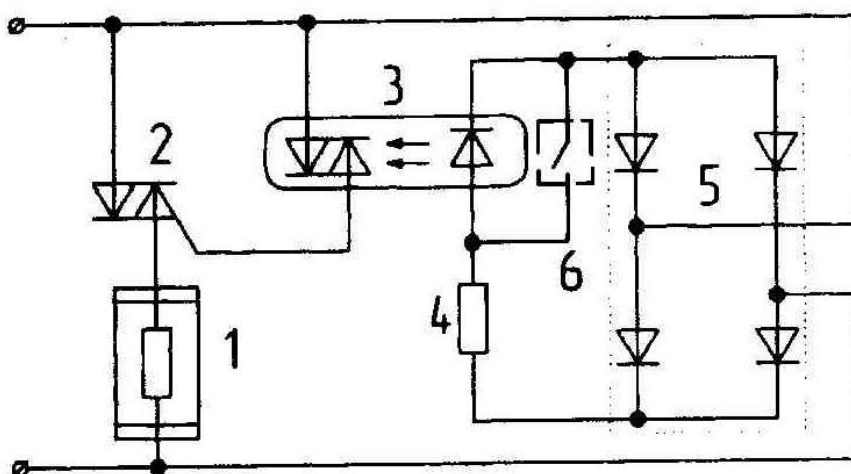
При підвищенні температури в контрольній точці біметалева пластина вигинається і замикає контакти виводів термометра 6, шунтуючи вхідний світлодіод оптопари 3. При цьому вихідний симістор оптопари 3 закривається, а також закривається і симістор 2, нагрівач 1 знеструмлюється.

Таким чином, застосування біметалевого термометра, включеного паралельно світлодіоду оптопари, забезпечує безпечну роботу з терморегулятором і підвищує його надійність.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Терморегулятор, що містить послідовно з'єднані нагрівач і симістор як виконавчий елемент, в коло керуючого електрода симістора включений вихідний симістор оптопари, світлодіод якої через резистор і діодний міст ввімкнений на напругу мережі, який відрізняється тим, що паралельно світлодіоду включено біметалевий термометр.

UA 126339 U



Комп'ютерна верстка В. Мацело

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ. 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 129594

(13) U

(51) МПК

G01K 7/34 (2006.01)

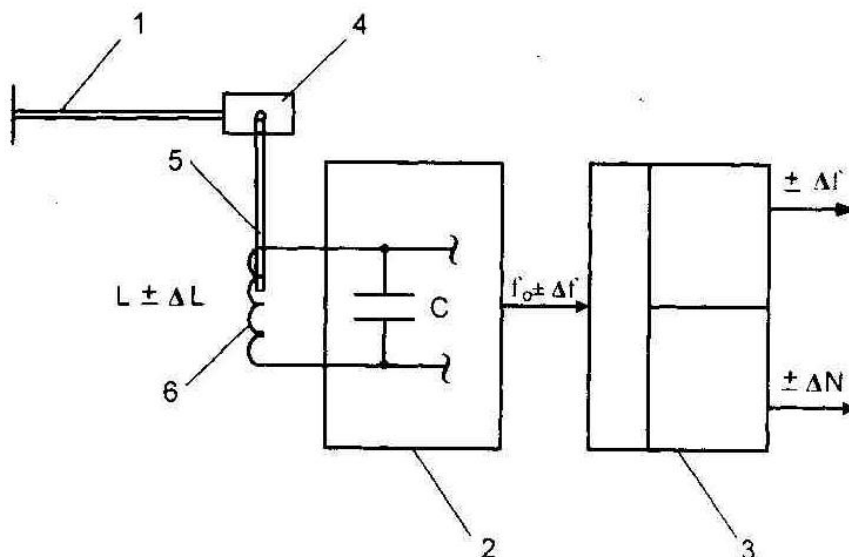
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2018 03081	(72) Винахідник(и):	Кошовий Микола Дмитрович (UA), Беляєва Анна Андріївна (UA), Кошова Ірина Іванівна (UA), Костенко Олена Михайлівна (UA)
(22) Дата подання заявки:	26.03.2018	(73) Власник(и):	НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.С. ЖУКОВСЬКОГО "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ", вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	12.11.2018		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	12.11.2018, Бюл.№ 21		

(54) БІМЕТАЛЕВИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ

(57) Реферат:

Біметалевий датчик температури містить чутливий елемент, LC-автогенератор електричних коливань та мікроконтролер. Чутливий елемент являє собою консольно закріплену біметалеву плоску пластину, вільний кінець якої передавальним механізмом з'єднано з магнітним осердям котушки індуктивності, ввімкненої у контур LC-автогенератора електричних коливань.



UA 129594 U

UA 129594 U

Корисна модель належить до вимірювальної техніки і може бути використана в промислових та побутових приладах для вимірювання температури.

Відомий біметалевий датчик температури, що являє собою навиту із плоскої біметалевої стрічки гвинтову пружину, один кінець якої закріплено нерухомо, а другий механічно зв'язано з рухомим контактом реостатного вимірювального перетворювача (Лаврова Т.А. Элементы автоматических приборных устройств. - М.: Машиностроение, 1975. - С. 90-93.).

До недоліків такого датчика слід віднести: недостатню надійність із-за наявності ковзаючого контакту реостатного вимірювального перетворювача, відсутність частотного та цифрового вихідних сигналів.

Найближчим аналогом до запропонованої корисної моделі вибраний біметалевий датчик температури, що має хімічно покрити шаром металу з високою електропровідністю пружину із плоскої біметалевої стрічки, яка підключена у контур вимірювального LC - автогенератора електричних коливань, з'єднаного з мікроконтролером (патент України № 55106, МПК G01K 7/01, G01K 5/00, Бюл. № 23, 2010р.).

До недоліків такого датчика слід віднести: недостатню чутливість та точність вимірювання температури; складність виготовлення біметалевої пружини; відносно велика вартість покриття пружини.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення чутливості та точності вимірювання температури, спрощення процесу виготовлення датчика.

Поставлена задача вирішується тим, що біметалевий датчик температури, що містить чутливий елемент, LC-автогенератор електричних коливань та мікроконтролер, згідно з корисною моделлю чутливий елемент являє собою консольно закріплену біметалеву плоску пластину, вільний кінець якої передавальним механізмом з'єднано з магнітним осердям котушки індуктивності, ввімкненої у контур LC-автогенератора електричних коливань. Причому замість біметалевої плоскої пластини можна застосувати і біметалеву пластину, скручену у формі спіралі.

Застосування нових елементів (біметалева плоска пластина, передавальний механізм, магнітне осердя котушки індуктивності) та зв'язків між ними (консольно закріплена біметалева плоска пластина вільним кінцем через передавальний механізм з'єднано з магнітним осердям котушки індуктивності) забезпечує підвищення чутливості та точності вимірювання температури, зменшення складності та вартості виготовлення біметалевої пластини.

На графічному зображенні наведено схему біметалевого датчика температури.

Біметалевий датчик температури містить чутливий елемент 1, LC-автогенератор електричних коливань 2 та мікроконтролер 3. Чутливий елемент 1 являє собою консольно закріплену біметалеву пластину, вільний кінець якої через передавальний механізм 4 з'єднано з магнітним осердям 5 котушки індуктивності 6. Котушка індуктивності 6 ввімкнена у контур LC-автогенератора електричних коливань 2, який з'єднано з мікроконтролером 3.

Датчик працює наступним чином.

При початковому значенні температури T_0 (наприклад, $T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$) встановлюється початкове положення магнітного осердя 5 в котушці індуктивності 6, яка буде мати індуктивність L_0 . При

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

цьому початкове значення частоти автогенератора електричних коливань 2 надходить на мікроконтролер, який запрограмовано на компенсацію цього значення частоти і формування інформативних параметрів датчика - частоти Δf і цифрового коду ΔN пропорційних значенню вимірюваної температури. Таким чином, на виходах мікроконтролера 3 встановлюються початкові значення вихідних сигналів датчика $\Delta f=0$, $\Delta N=0$. Зміна температури на величину ΔT (наприклад, підвищення) призводить до деформації біметалевої пластини 1, вільний кінець якої через передавальний механізм 4 призводить до переміщення магнітного осердя 5 всередині котушки індуктивності 6. Це, в свою чергу, визиває зміну індуктивності L_0 на величину ΔL і частоти f_0 автогенератора електричних коливань 2 на величину Δf . Таким чином на частотному та цифровому виходах мікроконтролера 3 встановлюються значення Δf і ΔN , пропорційні значенню вимірюваної температури ΔT .

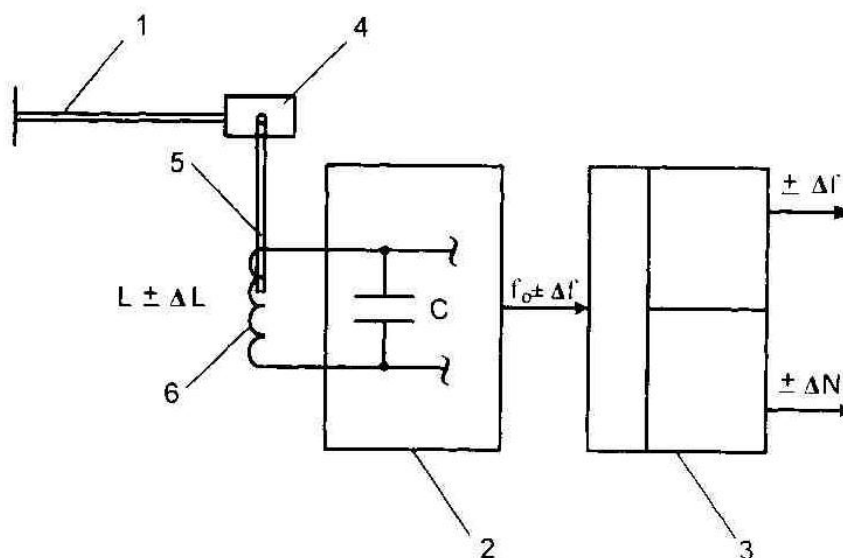
Запропонований біметалевий датчик температури дозволяє підвищити чутливість та точність вимірювання температури, знизити складність і вартість виготовлення датчика.

55 ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Біметалевий датчик температури, що містить чутливий елемент, LC-автогенератор електричних коливань та мікроконтролер, який відрізняється тим, що чутливий елемент являє

UA 129594 U

- собою консольно закріплену біметалеву плоску пластину, вільний кінець якої передавальним механізмом з'єднано з магнітним осердям котушки індуктивності, ввімкненої у контур LC-автогенератора електричних коливань.
- 5 2. Біметалевий датчик температури за п. 1, який відрізняється тим, що замість біметалевої плоскої пластини з магнітним осердям котушки індуктивності через передавальний механізм з'єднується вільний кінець біметалевої пластини, скрученої у формі спіралі.



Комп'ютерна верстка І. Мироненко

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42; 01601



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **129696** (13) **U**
(51) МПК
G01F 11/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2018 04607	(72) Винахідник(и):	Кошовий Микола Дмитрович (UA), Бєляєва Анна Андріївна (UA), Костенко Олена Михайлівна (UA)
(22) Дата подання заявки:	26.04.2018	(73) Власник(и):	НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.Є. ЖУКОВСЬКОГО "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ", вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	12.11.2018		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	12.11.2018, Бюл.№ 21		

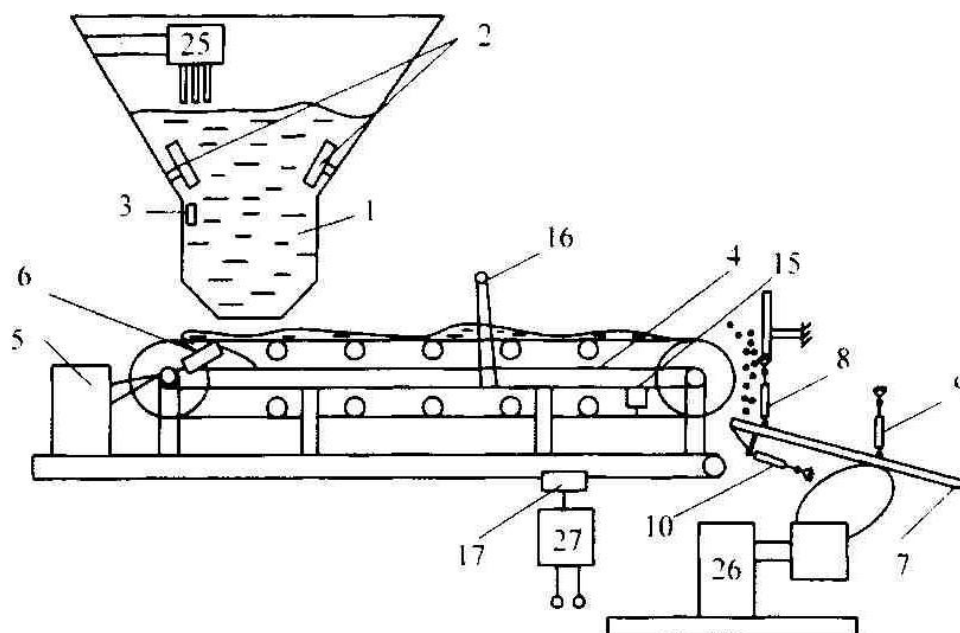
(54) ВАГОВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА

(57) Реферат:

Ваговимірювальна система містить бункер і похилий вимірювальний лоток прямокутної форми перерізу з електроприводом, зв'язаний шарнірними з'єднаннями з трьома тензорезистивними датчиками сили, стрічковий конвеєр з електроприводом, встановлений під бункером, датчик швидкості руху стрічки, датчик температури, датчик розтягування стрічки, розміщені у бункері, датчик вологості матеріалу, дозатор й електровібратор, кінцеві вимикачі, закріплені на конвеєрі, три аналого-цифрові перетворювачі, які підключені до мікропроцесора, з'єданого із блоком індикації, функціональною клавіатурою, адресним дешифратором, накопичувачем пам'яті, оперативним запам'ятовувальним пристроєм, регістром адреси, цифро-аналоговим перетворювачем, підключеним до електроприводів стрічкового конвеєра і похилого вимірювального лотка, дозатора й електровібратора, а тензорезистивні датчики сили з'єднані з аналого-цифровими перетворювачами, крім того до її складу введений терморегулятор, до якого підключений датчик температури.

UA 129696 U

UA 129696 U



Фиг. 1

UA 129696 U

Корисна модель належить до засобів для вимірювання вагової витрати гранульованого або порошкоподібного матеріалу та може застосовуватися для багатьох підприємств харчової, металургійної та гірничорудної промисловостей.

Відома ваговимірювальна система, що містить бункер і похилий вимірювальний лоток прямокутної форми перерізу, зв'язаний шарнірними з'єднаннями з трьома тензорезистивними датчиками сили, стрічковий конвеєр з електроприводом, встановлений під бункером, датчик швидкості руху стрічки, датчик температури, датчик розтягування стрічки, датчик вологості матеріалу, що розташований у бункері, кінцеві вимикачі, закріплені на конвеєрі, три аналого-цифрові перетворювачі, які підключені до мікропроцесора, з'єданого із блоком індикації, функціональною клавіатурою, адресним дешифратором, накопичувачем пам'яті, оперативним запам'ятовувальним пристроєм, регістром адреси, цифро-аналоговим перетворювачем, підключеним до електропривода і електровібратора, що розташований у бункері, а тензорезистивні датчики сили з'єдані з аналого-цифровими перетворювачами (патент на корисну модель № 27285, Україна, G01F 11/00, Бюл. № 17, 25.10.2007 р.).

Недоліками відомої ваговимірювальної системи є: відсутність управління такими параметрами як кут нахилу вимірювального лотка, вологість і температура матеріалу, неможливість моделювання процесів вимірювання вагової витрати сипких матеріалів.

Найбільш близькою до запропонованої корисної моделі є ваговимірювальна система, що містить бункер і похилий вимірювальний лоток прямокутної форми перерізу з електроприводом, зв'язаний шарнірними з'єднаннями з трьома тензорезистивними датчиками сили, стрічковий конвеєр з електроприводом, встановлений під бункером, датчик швидкості руху стрічки, датчик температури, датчик розтягування стрічки, розміщені у бункері датчик вологості матеріалу, дозатор й електровібратор, кінцеві вимикачі, закріплені на конвеєрі, три аналого-цифрові перетворювачі, які підключені до мікропроцесора, з'єданого з блоком індикації, функціональною клавіатурою, адресним дешифратором, накопичувачем пам'яті, оперативним запам'ятовувальним пристроєм, регістром адреси, цифро-аналоговим перетворювачем, підключеним до електроприводів стрічкового конвеєра і похилого вимірювального лотка, дозатора й електровібратора, а тензорезистивні датчики сили з'єдані з аналого-цифровими перетворювачами (патент на корисну модель № 58098, Україна, G01F 11/00, Бюл. № 6, 25.03.2011 р.).

Недоліком ваговимірювальної системи є відсутність стабілізації температури гранульованого або порошкоподібного матеріалу. В основу корисної моделі поставлено задачу забезпечення можливості стабілізації температури гранульованого або порошкоподібного матеріалу.

Для досягнення визначеної мети у ваговимірювальній системі, що містить бункер і похилий вимірювальний лоток прямокутної форми перерізу з електроприводом, зв'язаний шарнірними з'єднаннями з трьома тензорезистивними датчиками сили, стрічковий конвеєр з електроприводом, встановлений під бункером, датчик швидкості руху стрічки, датчик температури, датчик розтягування стрічки, розміщені у бункері датчик вологості матеріалу, дозатор й електровібратор, кінцеві вимикачі, закріплені на конвеєрі, три аналого-цифрові перетворювачі, які підключені до мікропроцесора, з'єданого із блоком індикації, функціональною клавіатурою, адресним дешифратором, накопичувачем пам'яті, оперативним запам'ятовувальним пристроєм, регістром адреси, цифро-аналоговим перетворювачем, підключеним до електроприводів стрічкового конвеєра і похилого вимірювального лотка, дозатора й електровібратора, а тензорезистивні датчики сили з'єдані з аналого-цифровими перетворювачами, згідно з корисною моделлю до її складу введений терморегулятор, до якого підключений датчик температури.

Застосування нових елементів (терморегулятор) та зв'язків між ними (до терморегулятора підключений датчик температури) забезпечує стабілізацію температури гранульованого або порошкоподібного матеріалу.

На фіг. 1 зображено загальний вигляд системи і конструкцію ваговимірювального лотка, а на фіг. 2 функціональну схему ваговимірювальної системи.

Ваговимірювальна система складається із бункера 1 з компонентом, що дозується, електровібратора 2, датчика вологості матеріалу 3, який розміщений у бункері 1, встановленого під бункером 1 стрічкового конвеєра 4 з електроприводом 5, датчика 6 швидкості руху стрічки конвеєра 4. Під конвеєром 4 закріплений похилий вимірювальний лоток 7, зв'язаний шарнірними з'єднаннями з трьома тензорезистивними датчиками сили 8, 9, 10, що підключені до аналого-цифрових перетворювачів 11, 12, 13, з'єднаних з мікропроцесором 14. Датчик 15 розтягання стрічки, кінцеві вимикачі 16, датчик 6 швидкості руху стрічки конвеєра 4, які закріплені на конвеєрі 4 і датчик 17 температури підключені до мікропроцесора 14, з'єданого з адресним

UA 129696 U

дешифратором 18, накопичувачем пам'яті 19, оперативним запам'ятовувальним пристроєм 20, регістром 21 адреса, блоком 22 індикації і функціональною клавіатурою 23, цифро-аналоговим перетворювачем 24, підключеним до електроприводу 5 і електровібратору 2. До мікропроцесора 14 через цифро-аналоговий перетворювач 24 підключені також дозатор 25, розміщений у бункері 1, і електропривід 26 вимірювального лотка 7. Датчик температури 17 підключений до терморегулятора 27.

Ваговимірювальна система працює наступним чином.

Шихта з бункера 1 надходить на стрічковий конвеєр 4, потім на вимірювальний лоток 7. Надходження сипкого матеріалу на стрічковий конвеєр контролюється за допомогою кінцевих вимикачів 16, які розташовані над поверхнею стрічкового конвеєра 4. Якщо сипкий матеріал надходить у достатній кількості на стрічковий конвеєр 4, то кінцеві вимикачі 16 не спрацьовують, якщо в недостатній кількості, то вони спрацьовують. У випадку спрацювання кінцевих вимикачів 16 подається сигнал на мікропроцесор 14, з якого через цифро-аналоговий перетворювач 24 подається сигнал на електровібратор 2. Якщо надходження сипкого матеріалу не почалося, то мікропроцесор 14 видає сигнал на електропривід 5 стрічкового конвеєра 4 для його зупинки, а також на блок 22 індикації - сигнал аварійної зупинки стрічкового конвеєра 4. З конвеєра сипкий матеріал надходить на вимірювальний лоток 7.

Сипкий матеріал, що рухається по вимірювальному лотку 7, впливає на тензорезистивні датчики 8, 9, 10 сили розтягування (ТДС). Сигнали з ТДС за допомогою аналого-цифрових перетворювачів 11, 12, 13 перетворюються на цифрові та обробляються мікропроцесором 14. У даній системі використовується шарнірне кріплення всіх вузлів, вони дозволяють позбутися поперечних сил моментів, що виникають у результаті температурного впливу та деформацій окремих деталей і вузлів монтажу.

Для врахування впливу вологості сипкого матеріалу використовується датчик 3 вологості, сполучений безпосередньо з мікропроцесором 14. Якщо вологість матеріалу відрізняється від заданої, то мікропроцесор 14 через цифро-аналоговий перетворювач 24 видає сигнал на дозатори 25 для зміни вологості матеріалу. При цьому сипкий матеріал в бункері 1 перемішується електровібратором 2, що підключається. Мікропроцесор 14 через цифро-аналоговий перетворювач 24 також подає сигнал на електропривід 26 для установки відповідного кута нахилу вимірювального лотка 7.

Для врахування впливу температури використовується датчик температури 17, що введений до складу терморегулятора 27 і підключений до мікропроцесора 14. Це забезпечує стабілізацію температури шихти.

Кількість шихти, яка надходить на вимірювальний лоток 7, регулюється зміною швидкості руху стрічки конвеєра 4, для цього в системі використовується датчик 6 швидкості руху конвеєрної стрічки:

- якщо витрата шихти недостатня, то мікропроцесор 14 видає сигнал на електропривід 5 конвеєра 4 для підвищення швидкості руху конвеєрної стрічки;

- якщо витрата шихти перевищила задану, то мікропроцесор 14 видає сигнал на електропривід 5 конвеєра 4 для зменшення швидкості руху конвеєрної стрічки.

Цей процес триває до тих пір, доки витрата матеріалу не буде відповідною заданій величині.

Вага сипкого матеріалу розраховується мікропроцесором 14 за сигналами, що надійшли із тензорезистивних датчиків сили розтягування 8, 9, 10 через аналого-цифрові перетворювачі 11, 12, 13.

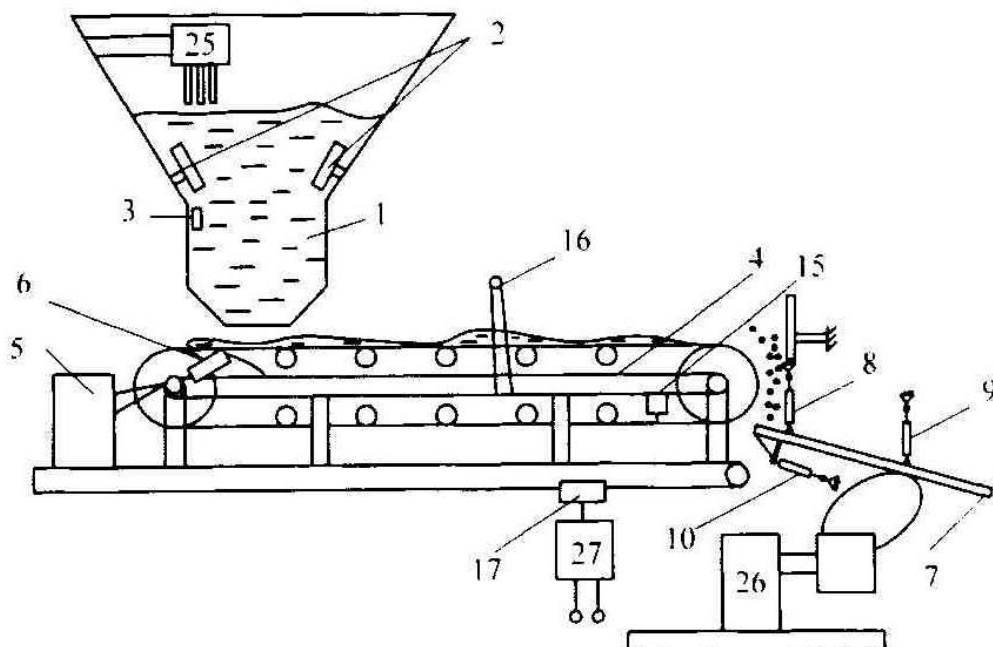
Таким чином, застосування управління такими факторами як швидкість руху стрічки конвеєра, кут нахилу вимірювального лотка, вологість і температура сипкого матеріалу дозволяє підвищити точність вимірювання ваговимірювальної системи та забезпечити високу точність дозування сипкого матеріалу.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Ваговимірювальна система, що містить бункер і похилий вимірювальний лоток прямокутної форми перерізу з електроприводом, зв'язаний шарнірними з'єднаннями з трьома тензорезистивними датчиками сили, стрічковий конвеєр з електроприводом, встановлений під бункером, датчик швидкості руху стрічки, датчик температури, датчик розтягування стрічки, розміщені у бункері датчик вологості матеріалу, дозатор й електровібратор, кінцеві вимикачі, закріплені на конвеєрі, три аналого-цифрові перетворювачі, які підключені до мікропроцесора, з'єднаного із блоком індикації, функціональною клавіатурою, адресним дешифратором, накопичувачем пам'яті, оперативним запам'ятовувальним пристроєм, регістром адреси, цифро-аналоговим перетворювачем, підключеним до електроприводів стрічкового конвеєра і похилого

UA 129696 U

вимірювального лотка, дозатора й електровібратора, а тензорезистивні датчики сили з'єднані з аналого-цифровими перетворювачами, яка відрізняється тим, що до її складу введений терморегулятор, до якого підключений датчик температури.



Фіг. 1

