

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 багатofакторного 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 багатofакторного 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

багатофакторного експерименту за часовими (вартісними) витратами: повного перебору, випадкового пошуку, гілок і меж, найближчого сусіда, жадібного алгоритму, імітації відпалу, 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 багатофакторного 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 багатофакторного 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 багатофакторного 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 промисловостей, 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 багатфакторного 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) витратами планів багатфакторного експерименту, оснований 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, ґрунтованого 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 багатофакторного 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 багатофакторного 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 «ХАИ», 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 роєм частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. *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. Вип. 4 (47). С. 179-187. (Web of Science)

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 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., Беляєва 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 мжнар. 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.