

АНОТАЦІЯ

Кошова І.І. *Методи та засоби оптимального планування експериментів для дослідження технологічних процесів, пристроїв і систем.* – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерні інтегровані технології». – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2020.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення науково-практичної задачі розробки та впровадження методів і засобів оптимального планування експериментів для дослідження технологічних процесів, пристроїв і систем.

Основна частина дисертації складається зі вступу, чотирьох розділів, розбитих на підрозділи, висновків, списку використаної літератури, додатків.

Перший розділ дисертації присвячено розгляду стану проблеми оптимального за вартісними (часовими) витратами планування експериментів для дослідження технологічних процесів, пристроїв і систем.

Проведено порівняльний аналіз методів синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту. Видані рекомендації по застосуванню цих методів для дослідження реальних об'єктів. Наведено перелік програм, які реалізують методи пошуку оптимальних планів багатофакторних експериментів. Показана необхідність розробки точних та швидкісних методів синтезу оптимальних планів експерименту для об'єктів із кількістю факторів $k \geq 4$.

Оскільки в сучасних системах контролю та керування різноманітними об'єктами широке застосування знаходять датчики тиску та перетворювачі лінійних і кутових переміщень, тому проведено їх аналіз.

Аналіз підтвердив необхідність розробки нових перетворювачів, направлених на покращення таких характеристик як точність, чутливість, надійність, технологічність, масо-габаритні характеристики, простота конструкції, вартість, розширення їх функціональних можливостей.

У другому розділі розроблені методи синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів дробового та повного факторних експериментів, а також композиційних планів, засновані на використанні коду Грея. Запропоновані методи дозволяють проводити пошук планів без повного перебору варіантів перестановок.

Показано, що методи побудови планів багатофакторних експериментів, основані на застосуванні коду Грея, синтезують плани оптимальні за числом переходів рівнів факторів, але не завжди дають плани оптимальні за вартістю (часом) реалізації. У зв'язку з цим вирішена актуальна задача по скороченню множини планів експерименту для пошуку оптимального за вартісними (часовими) витратами. Розроблені комп'ютерні програми, які формують бази даних та значно скорочують множину планів експерименту для пошуку оптимального за вартісними (часовими) витратами на його реалізацію. Програмне забезпечення побудовано за модульним принципом та забезпечує гнучку адаптацію для вирішення більш широкого класу задач.

Третій розділ присвячено оптимальному плануванню експериментів для дослідження вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень і технологічних процесів нанесення покриттів. Оптимізовані за вартісними (часовими) витратами плани багатофакторних експериментів для дослідження фотоелектричних перетворювачів кутового переміщення рульової поверхні літака, радіолокаційної системи, вихорострумових вимірювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях і таких технологічних процесів як нанесення гальванічних покриттів однакової товщини на друковані плати, процесу глибокого плазмохімічного травлення MEMS, процесу пресування корпусу катера із склопластику. Показано, що виграші у порівнянні з начальними планами по вартості реалізації отриманих планів експерименту для дослідження перерахованих об'єктів знаходяться в межах від 1,28 до 4,04 разів, а в часі реалізації – в 1,36 рази при дослідженні шорсткості поверхні кремнію у процесах глибокого плазмохімічного травлення MEMS.

Таким чином, доказана працездатність та ефективність методів оптимізації планів багатофакторних експериментів, оснований на застосуванні кода Грея.

В четвертому розділі запропоновані перетворювачі лінійних і кутових переміщень в цифровий код та волоконно-оптичні датчики тиску, які дозволяють підвищити точність вимірювання вказаних параметрів, чутливість, надійність, технологічність, розширити діапазон вимірювання та спростити їх конструкцію. При цьому удосконалені методи вимірювання тиску і лінійних та кутових переміщень.

Запропоновані комп'ютерні системи для моделювання багатофакторних об'єктів дослідження та контролю їх параметрів. Для реалізації цих комп'ютерних систем розроблені наступні апаратні засоби: автоматизована система реалізації багатофакторного експерименту, система керування багатофакторним експериментом, автоматизована система проведення багатофакторного експерименту, пристрій формування планів багатофакторних експериментів, пристрій для визначення характеристик факторних послідовностей, пристрій для визначення характеристик планів багатофакторних експериментів, пристрій для визначення еквівалентності планів багатофакторного експерименту, пристрій перетворення планів багатофакторного експерименту.

Розроблені апаратні засоби, перетворювачі та датчики захищені патентами України на корисну модель.

У висновках наведені основні наукові та практичні результати, перераховані підприємства і організації, в яких їх впроваджено.

В додатках приведені акти впровадження результатів дисертації, копії патентів на корисну модель та свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми, список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію її результатів.

В дисертаційній роботі вперше отримані нові наукові результати:

– методи побудови оптимальних або близьких до оптимальних за

вартісними витратами планів повного та дробового факторних експериментів, які відрізняються від існуючих тим, що ґрунтуються на застосуванні коду Грея, що дозволяє швидко будувати такі плани експериментів без перебору варіантів перестановок дослідів;

– метод побудови оптимальних за вартісними витратами планів багатофакторного експерименту, який враховує вартість зміни рівнів факторів і відрізняється від існуючих тим, що оснований на побудові кодів з мінімальною кількістю змін з заданими властивостями, що дозволяє будувати оптимальні комбінаторні плани без перебору варіантів перестановок дослідів.

Набула подальшого розвитку методологія підвищення ефективності експериментальних досліджень технологічних процесів, пристроїв і систем в плані розробки швидкісного методу побудови оптимальних або близьких до оптимальних композиційних планів експериментів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи дозволяють скоротити вартісні та часові витрати на дослідження пристроїв і систем, що особливо важливо в умовах промислових експериментів.

Запропоновані методи побудови оптимальних за вартісними і часовими витратами планів багатофакторних експериментів реалізовані у вигляді апаратних і програмних засобів, на які отримані патенти України на корисну модель та свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми.

Удосконалені вимірювальні перетворювачі лінійних і кутових переміщень в цифровий код, волоконно-оптичні датчики тиску можуть знайти застосування для проектування систем контролю та управління.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертації впроваджені в практику підприємств і організацій: Приватне акціонерне товариство «Авіаконтроль» (м. Харків), ТОВ «ВО ОВЕН» (м. Харків), Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут».

Ключові слова: перетворювач, лінійні та кутові переміщення, датчик тиску, комп'ютерна система, код Грея, план експерименту, вартість, час.

Список публікацій здобувача:

Статті у наукових фахових виданнях

1. Кошечая И.И., Кошевой Н.Д., Костенко Е.М, Рожнова Т.Г. Датчики давления с цифровым выходом: монография. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2017. 108 с.

2. Кошечая И.И., Кошевой Н.Д., Раскин Л.Г. Синтез оптимальных по стоимостным или временным затратам планов полного факторного эксперимента. Радиоелектронні і комп'ютерні системи. 2016. №2. С.46-50.

3. Кошечая И.И., Заболотный А.В., Кошевой Н.Д. Синтез оптимальных по стоимостным или временным затратам планов дробного факторного эксперимента. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сборник научных трудов. Харьков: ХАИ, 2016. Вып. 72. С.177-182.

4. Кошечая И.И., Кошевой Н.Д., Заболотный А.В., Костенко Е.М. Метод синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам композиционных планов многофакторного эксперимента. Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ: ВІКНУ, 2016. №53. С.31-34.

5. Кошечая И.И., Кошевой Н.Д., Костенко Е.М. Сравнительный анализ методов синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов многофакторного эксперимента. Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ: ВІКНУ, 2016. №54. С.33-36.

6. Кошова І.І., Кошовий М.Д., Рожнова Т.Г. Волоконно-оптичний

датчик тиску. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків: ХНТУСГ, 2017. Вип. 187. С.70-71.

7. Кошечая И.И., Кошевой Н.Д., Костенко Е.М. Применение методов оптимизации, основанных на коде Грея, при исследовании технологических процессов и приборов. Вісник Херсонського національного технічного університету. Херсон: ХНТУ, 2018. №3(66). Том 2. С.241-245.

8. Кошечая И.И., Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Павлик А.В., Рожнова Т.Г. Исследование множества планов многофакторных экспериментов с минимальным числом переходов уровней факторов. Радіоелектроніка, інформатика, управління. Запоріжжя, 2019. №2. С.53-59 (Web of Science).

9. Кошова І.І., Кошовий М.Д., Костенко О.М. Оптимальне планування експериментів для дослідження технологічних процесів. Вісник Херсонського національного технічного університету. Херсон: ХНТУ, 2019. №2(69). Частина 2. С.81-85.

10. Кошова І.І., Кошовий М.Д., Заболотний О.В., Цеховський М.В., Костенко О.М. Дослідження і оптимізація вихорострумового вимірювача товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів. Український метрологічний журнал. Харків, 2020. №2. С. 33-39 (Web of Science).

Патенти на корисну модель

11. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень: пат. №114368 Україна: МПК (2006.01) G01B 11/26 / Заболотний О.В., Кошова І.І., Кошовий М.Д. № U201608593; заявл. 05.08.2016; опубл. 10.03.2017, Бюл. №5. 3с.

12. Перетворювач лінійних переміщень штока пневмоциліндра в цифровий код: пат. №116559 Україна: МПК (2017.01) G01B 11/00 / Кошовий М.Д., Заболотний О.В., Кошова І.І., Костенко О.М. № U201612585; заявл. 09.12.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. №10. 3с.

13. Автоматизована система пошуку оптимального плану багатофакторного експерименту: пат. №116558 Україна: МПК (2017.01) G06F 17/00 / Кошовий М.Д., Кошова І.І., Костенко О.М., Дергачов В.А., Павлик Г.В. № U201612573; заявл. 09.12.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. №10. 3с.

14. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень: пат. №119374 Україна: МПК (2016.01) G01B 11/26 / Кошовий М.Д., Заболотний О.В., Дергачов В.А., Костенко О.М., Кошова І.І. № U201702898; заявл. 27.03.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. №18. 2с.

15. Автоматизована система проведення багатофакторного експерименту: пат. №119811 Україна: МПК (2017.01) G06F 17/00 / Кошовий М.Д., Кошова І.І., Дергачов В.А., Павлик Г.В., Костенко О.М. № U201703727; заявл. 18.04.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. №19. 3с.

16. Перетворювач лінійних переміщень штока пневмоциліндра в цифровий код: пат. №121150 Україна: МПК (2017.01) G01B 11/00 / Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Заболотний О.В., Кошова І.І., Костенко О.М. № U201706137; заявл. 19.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. №22. 2с.

17. Перетворювач кутових переміщень: пат. №126329 Україна: МПК (2006.01) G01B 7/30 / Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Кошова І.І., Костенко О.М. U201801390; заявл. 12.02.2018; опубл. 11.06.2018, Бюл. №11. 3с.

18. Волоконно-оптичний датчик кутових переміщень: пат. №129946 Україна: МПК (2006.01) G01B 11/26 / Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Кошова І.І., Костенко О.М. № U201803908; заявл. 11.04.2018; опубл. 26.11.2018, Бюл. №22. 4с.

19. Перетворювач кутових переміщень: пат. №133164 Україна: МПК (2006.01) G01B 7/30 / Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Кошова І.І., Костенко О.М. № U201810412; заявл. 22.10.2018; опубл. 25.03.2019, Бюл. №6. 2с.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір

20. Комп'ютерна програма «Програма формування варіантів кодів з мінімальними змінами» / І.І. Кошова, М.Д. Кошовий, В.А. Дергачов, Г.В. Павлик, О.М. Костенко: свід. про реєстр. автор. права на твір № 74877. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 21.11.2017 р.

21. Комп'ютерна програма «Програма формування типових планів багатофакторного експерименту» / І.І. Кошова, М.Д. Кошовий, В.А. Дергачов, Г.В. Павлик, О.М. Костенко: свід. про реєстр. автор. права на твір № 74881. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 21.11.2017 р.

Опубліковані праці апробаційного характеру

22. Кошова И.И., Кошовой, Н.Д., Бельмега А.В. Оптимизация композиционных планов второго порядка с использованием жадного алгоритма и алгоритма имитации отжига. Proceeding of the III international scientific and practical conference «Topical Problems of Modern science and Possible Solutions»: International scientific and practical conference «WORLD SCIENCE» (Dubai, UAE, September 28–29, 2016). October 2016. Vol.1. №10(14), P. 11–16.

23. Кошова И.И., Кошовой, Н.Д., Заболотный А.В. Метод синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов дробного факторного эксперимента: матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2016), м. Суми, 22-23 вересня, 2016 р. Сум. ДУ, 2016. С. 169-170.

24. Кошова І.І., Кошовий М.Д., Костенко О.М. Методи оптимізації по вартісним (часовим) витратам планів багатофакторних експериментів: тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи-2017», присвяченої пам'яті В.М. Шарапова, с. Лазурне, 18-22 вересня 2017 р. Черкаси: видавець Третьяков О., 2017. С.13-14.

25. Кошова І.І., Кошовий М.Д., Заболотний О.В. Фотоелектричні перетворювачі кутових переміщень: Актуальні проблеми автоматики та

приладобудування, матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції.м. Харків, 7-8 грудня 2017 р. Харків: ФОП Мензіна В., 2017. С.171-173.

26. Koshevaya I.I., Koshevoy N.D., Fesenko A.G. Angular displacement transducers: Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси. Дванадцята МНПК. Збірка тез, м. Київ, 21-22 травня 2019 р. Київ: НАУ, 2019. С. 66-68.

27. Koshevaya I, Koshevoy N, Zabolotny A, Kostenko E, Rozhnova T. Research of moisture-meter device for bulk and liquid materials. 29th International Scientific Symposium & amp; amp; amp; amp; amp; quot; Metrology and Metrology Assurance & amp; amp; amp; amp; amp; quot; MMA 2019 – Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/MMA.2019.8935983> (Scopus).

28. Кошечая И.И. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании радиолокационной системы: дванадцята міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє». м. Київ, 25 листопада 2016 р. Київ: ВІКНУ, 2016. С. 51.

29. Кошова І.І. Оптимізація за вартісними (часовими) витратами планів експерименту: Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні (ІКТМ-2017). Збірка матеріалів конференції. м. Харків, 2-5 листопада 2017 р. Харків: ХАІ, 2017. Том 2. С. 88.

30. Кошова І.І., Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Павлик Г.В. Метод побудови оптимальних планів багатфакторного експерименту: Проблеми інформатизації: тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції, Черкаси-Харків-Баку-Бельско-Бела, 13-15 листопада 2019 р. Черкаси, 2019. Том 3. С. 114.

31. Koshevaya I.I., Koshevoy N.D., Zabolotnyi A.V., Muratov V.V., Rozhnova T.G. Fiber-optic pressure instrument transducers. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Conference proceedings (Kharkov, 28-30 November, 2019). Advances in intelligent systems and Computing. Springer.

2019. Vol. 1113. p.p. 11-23 (Scopus).

32. Кошова І.І., Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Павлик Г.В. Комбінаторний підхід у плануванні експерименту. Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Тези доповідей десятої міжнародної науково-технічної конференції. 9-10 квітня 2020 р. Том 2. Баку-Харків-Жиліна, 2020. С. 44.

33. Кошова І.І., Дергачов В.А., Кошовий М.Д., Павлик Г.В. Метод побудови оптимальних комбінаторних планів експерименту. Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції «Авіація, промисловість, суспільство», присвяченої 60-річчю КЛК ХНУВС, 14 травня 2020 р., частина 1. Кременчук, 2020. С. 372-374.

ABSTRACT

Koshova I.I. ***Methods and instrumentality for optimal planning of experiments for the research in technological processes, devices and systems. – A qualifying scientific work as a manuscript.***

The thesis for a degree of Doctor of Philosophy (PhD) in speciality 151 – “Automation and Computer Integrated Technologies”. – M. E. Zhukovsky National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, 2020.

The thesis is aimed at solving the scientific and practical problem of developing and implementing methods and instrumentality of optimal planning experiments for the research in technological processes, devices and systems.

The main part of the thesis consists of introduction, four chapters divided into sections, conclusions, list of references, and appendices.

The first chapter of the thesis is devoted to the consideration of the state of the research problem of optimal experiment planning in cost (time) outlay for the study of technological processes, devices and systems.

A comparative analysis of methods for the synthesis of cost-optimal (time-

consuming) designs for a multi-factor experiment has been performed. Recommendations for the use of these methods for the study of real objects are given. A list of programs that implement methods for finding optimal designs for multi-factor experiments is presented. It has been shown that it is necessary to develop precise and fast methods for the synthesis of optimal designs of the experiment for objects with the number of factors $k \geq 4$.

The analysis has confirmed the need to develop new converters aimed at improving such characteristics as accuracy, sensitivity, reliability, manufacturability, mass-dimensional characteristics, simplicity of design, cost, and expansion of their functionality.

In the second chapter the methods of the synthesis of optimal designs by cost (time) expenses for fractional and complete factor experiments, as well as composite designs based on the Gray code application have been developed. The methods proposed allow searching for designs without the exhaustive search of permutations.

It has been shown that the methods of constructing designs for multi-factor experiments based on the Gray code application synthesize optimal designs by the number of transitions of factor levels, but do not always give optimal designs by cost (time) of implementation. In this regard, the actual problem of reducing the set of designs of the experiment for finding the optimal one by cost (time) expenses has been solved. Computer programs that form databases and significantly reduce the set of designs of the experiment to find the optimal one for its implementation by cost (time) expenses have been developed. The software has been designed by the modular principle and provides flexible adaptation to solve a wider class of problems.

The third chapter is devoted to the optimal planning of experiments for the study of measuring converters of linear and angular displacements and technological processes for coating. Designs for multi-factor experiments for the study of photovoltaic converters of angular movement of the steering surface of the aircraft, a radar system, eddy-current meters of dielectric coating thickness on metal surfaces and such technological processes as electroplating of the similar

thickness on printed circuit boards, the process of deep plasma-chemical etching of MEMS and the process of pressing boat's hull of fiberglass have been optimized by cost (time) expenses. It has been shown that the gains compared to the initial designs by the cost of implementation of experimental designs for the study of these objects are in the range from 1,28 to 4,04 times, and in 1.36 times by the time of implementation when studying the surface roughness of silicon in the processes of deep plasma-chemical etching of MEMS.

Thus, the efficiency and effectiveness of optimization methods of designs for multi-factor experiments based on the Gray code application have been proven.

In the fourth chapter linear and angular displacement converters into digital code and fiber-optic pressure sensors have been proposed; they allow to increase the accuracy of measurement of these parameters, sensitivity, reliability, manufacturability, expand the measurement range and simplify their design. At the same time, the methods for measuring pressure and linear and angular displacements have been improved.

The computer systems for modeling multi-factor objects of research and control of their parameters have been proposed. To implement these computer systems the following hardware has been designed: an automated system for implementing a multi-factor experiment, the control system of a multi-factor experiment, the automated system of conducting a multi-factor experiment, the device for forming plans of multifactor experiments, the device for determining the characteristics of the factorial sequence, the device for determining the characteristics of designs of multifactor experiments, the device for determining the equivalence of designs of a multi-factor experiment, the device for converting the design of a multi-factor experiment.

The hardware, converters and sensors developed are protected by patents of Ukraine for the utility model.

In conclusions the main scientific and practical results are given; the enterprises and organizations where they have been implemented are listed.

The appendices contain acts of implementation of the results of the thesis,

copies of utility model patents and certificates of copyright registration for computer programs, a list of publications of the applicant on the topic of the thesis and the information about the approbation of its results.

For the first time the following new scientific results have been obtained in the thesis:

- methods for constructing optimal designs by cost expenses for complete and fractional factor experiments, which differ from the existing ones by being based on the Gray code application and allow having rapid designs of experiments that are optimal or close to optimal ones without going through the permutations of experiments;

- the method for constructing optimal designs by cost expenses for a multi-factor experiment taking into account the cost of changing the levels of factors and differing from existing ones that it is based on the construction of codes with a minimum number of changes with specified properties. It allows having optimal combinatorial designs without searching the permutations of experiments;

- the methodology of increasing the efficiency of experimental studies of technological processes, devices and systems has been further developed in terms of developing high speed methods for constructing compositional designs of experiments that are optimal or close to optimal ones, as well as hardware and software for their implementation.

The practical significance of the results obtained is that the methods developed allow reducing the cost and time expenses for the study of devices and systems, and it is especially important in the conditions of industrial experiments.

The methods of constructing the optimal designs by the cost and time expenses for multi-factor experiments have been implemented in the form of hardware and software applications, for which the patents of Ukraine for the utility model and certificates of copyright registration for computer programs have been obtained.

Improved linear and angular displacement converters into digital code, fiber-optic pressure sensors can be used for the design of control and management

systems.

The results of the theoretical and experimental research of the thesis have been implemented in the practice of the following enterprises and organizations: private joint stock company “Aviacontrol” (Kharkiv), LLC “VO ARIES” (Kharkiv), M.E. Zhukovsky National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”.

Key words: converter, linear and angular displacements, pressure sensor, computer system, Gray code, experimental design, cost, time.