
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 371.147

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.2.12>

РОЗРОБКА БАГАТОФАКТОРНИХ ПЛАНІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З ВИСОКОЮ ТОЧНІСТЮ ЇХ АНАЛІТИЧНОГО ОПІСУ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАННЯХ

Чепок Р. В. – кандидат педагогічних наук,
доцент кафедри соціальних та поведінкових наук
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-9063-3244

На сучасному етапі прискореного бурхливого розвитку різних галузей науки і техніки, збагачення духовної культури людства, стрімкого соціального і політичного життя України ставляться відповідні вимоги до всебічного розвитку особистості в суспільстві розвинутої країни. Не мало важливим фактором в цьому аспекті постає навчальний процес у вищих закладах освіти.

Данна наукова стаття присвячена розробці ефективних методів планування багатофакторних експериментів з метою отримання високоякісних результатів у лабораторних умовах. Вона розглядає важливість точного опису планів експериментів для забезпечення оперативного та ефективного використання під час проведення лабораторних випробувань і написання випускних робіт у вищих закладах освіти.

В статті досліджуються методи вибору факторів та їх рівнів, а також планування експериментів. Для аналітичного опису планів експериментів розглянуті статистичні методи та моделі, які дозволяють визначити вплив окремих факторів та їх взаємодію на результати досліджень.

Автор статті пропонує практичні рекомендації з вибору оптимальних планів експериментів з високою точністю, що сприяє підвищенню ефективності лабораторних досліджень та прискоренню процесу прийняття рішень у наукових та промислових галузях.

Ця стаття має значний внесок у розвиток методів планування експериментів та забезпечення їхнього оперативного використання у лабораторних умовах та використання їх під час написання наукових і випускних робіт, а також деякою мірою ліквідує відсутність навчальної літератури з математичного моделювання систем і процесів для здобувачів закладів вищої освіти України різних технічних спеціальностей. Сучасний інженер повинен використовувати математику не тільки як метод розрахунку, а й як метод мислення, формалізації та формування інформаційних понять. Доповнюючи досвід інженера та його інтуїцію, багатофакторні плани експериментів з високою точністю їх аналітичного опису для оперативного використання створюють фундаментальну базу для розробки та експлуатації технічних систем і значно підвищують якісний рівень підготовки інженерів, інженерів-дослідників та наукових співробітників.

Ключові слова: багатофакторні плани експерименти, поліном, експериментальні значення, аналітичний опис, статистичні критерії, математичне поняття, план, значення фактору, комбінація плану.

Cherok R. V. Development of multifactorial plans of experiments with high accuracy of their analytical description for operational use in laboratory tests

At the current stage of accelerated rapid development of various fields of science and technology, enrichment of the spiritual culture of humanity, rapid social and political life of Ukraine, corresponding requirements are placed on comprehensive development of personality in the society of a developed country. The educational process in higher education institutions is a very important factor in this aspect.

This scientific article is devoted to the development of effective methods of planning multivariate experiments in order to obtain high-quality results in laboratory conditions. It examines the importance of accurately describing plans of experiments to ensure prompt and efficient use during laboratory testing and thesis writing in higher education institutions.

The author of the article offers practical recommendations for choosing optimal plans of experiments with high accuracy, which contributes to increasing the efficiency of laboratory research and accelerating the decision-making process in scientific and industrial fields.

This article has a significant contribution to the development of methods of planning experiments and ensuring their operational use in laboratory conditions and their use during the writing of scientific and graduation theses, as well as to some extent eliminates the lack of educational literature on mathematical modeling of systems and processes for students of higher education institutions of Ukraine of various technical specialties. A modern engineer should use mathematics not only as a method of calculation, but also as a method of thinking, formalization and formation of information concepts. Complementing the experience of the engineer and his intuition, multifactorial plans of experiments with high accuracy of their analytical description for operational use create a fundamental basis for the development and operation of technical systems and significantly increase the quality level of training of engineers, research engineers and scientific employees.

Key words: multifactorial plans of experiments, polynomial, experimental values, analytical description, statistical criteria, mathematical concept, plan, factor value, plan combination.

Постановка проблеми. Політехнічність освіти у закладах вищої освіти потребує надавати здобувачам освіти знання в галузі економіки і управління технологічними процесами виробництва. Найважливіша задача управління є оптимізація технологічних процесів для чого треба знати відповідні методи оптимізації.

Розробка багатофакторних планів експериментів з високою точністю для оперативного використання при лабораторних випробуваннях – це важлива задача, особливо у сферах науки і промисловості. Такі плани дозволяють ефективно вивчати вплив різних факторів на результати експерименту і оптимізувати процеси. Ось кілька кроків, які можна виконати для їх розробки: визначення цілей експерименту, вибір факторів і рівнів, планування досліджень, запуск експерименту, аналіз результатів, підтвердження та оптимізація.

У випадках, коли не має аналітичної теорії процесу, оптимізація можлива лише на основі аналітичного опису експериментів над технологічним процесом виробництва.

Опанувати цим методом оптимізації здобувачі вищої освіти можуть у навчальному процесі при виконанні лабораторних експериментів.

Для опису експериментів зараз використовується статистична теорія планування експериментів.

Існуюча теорія планування має суттєвий недолік. Він виникає при оцінюванні точності цього опису, тобто при вирішуванні питання про рівень відхилення експериментальних значень від розрахункових із аналітичного опису цих експериментів.

В теорії, що розглядається, вирішують це питання за допомогою статистичних критеріїв розподілу відхилень. Аналіз опису в цьому напрямку є досить складна задача для здобувачів вищої освіти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах сучасних дослідників викладено теоретичні та практичні основи математичного моделювання сучасних систем і процесів. Представлено узагальнену методику математичного моделювання для формалізованого опису, аналізу та різного способу організації математичного моделювання систем і процесів. Особливу увагу приділено можливостям сучасних інформаційних технологій з моделювання, аналізу, синтезу та оптимізації процесів і систем. Наведено приклади та розглянуто особливості використання базового математичного апарату для моделювання технічних систем (Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В., Лапач С. М.). Висвітлено основні питання методики та організації науково-дослідної діяльності. Викладено поняття, принципи, особливості планування, методи, структуру і технології теоретичних та експериментальних досліджень. Акцентовано на системному підході як напрямі наукового пізнання (Баласанян Г. А.). Викладено поняття, принципи, особливості планування, методи, структуру і технології теоретичних та експериментальних досліджень. Акцентовано на системному підході як напрямі наукового пізнання і соціальної практики. Значну увагу приділено питанням психології наукової діяльності, етики наукових досліджень, розвитку науково-творчого потенціалу особистості. Докладно охарактеризовано вимоги до написання та захисту магістерських кваліфікаційних робіт, узагальнено понятійний апарат науковця-початківця (Важинський С. Е., Щербак Т. І.).

Мета статті – розкрити теоретичні засади розробки багатofакторних планів експериментів з високою точністю їх аналітичного опису для оперативного використання при лабораторних випробуваннях, які не потребують статистичного аналізу опису, бо експериментальні і розрахункові дані співпадають точно при значеннях факторів з плану експеримента.

Виклад основного матеріалу. Створення та експлуатація сучасних комп'ютеризованих виробництв, технологій, приладів та систем на промислових підприємствах і їх експлуатація є не тільки функцією фахівців з економічного управління та фахівців з інформаційних технологій. Вони потребують різних форм участі практично всіх груп інженерно-технічного та адміністративно-управлінського персоналу підприємств та організацій. Сучасний інженер, який працює як дослідник чи проектувальник технічних систем, об'єктів і процесів або працює як користувач автоматизованих та інформаційних систем повинен мати глибокі теоретичні й практичні знання з математичного моделювання. Використання сучасних інформаційних технологій для моделювання технічних об'єктів, систем і процесів ґрунтується на математичних методах моделювання, які дозволяють моделювати виробничі ситуації, аналізувати наявні види інформації та виробляти оптимальні рекомендації щодо дій, які забезпечують найефективніше досягнення мети. Підготовка фахівців на межі двох наук – прикладної інженерії та розділів прикладної математики – надає майбутнім інженерам-економістам можливість ухвалювати оптимальні рішення, підвищувати ефективність їх обґрунтувань та бути провідниками ефективних засобів вирішення сучасних наукових і виробничих завдань. Впровадження математичних методів у різні інженерні дисципліни надає можливість користуватися новими, як правило, дуже ефективними засобами досліджень, розробки, виробництва та експлуатації технічних систем. Разом з тим, наукова та виробнича практика доводить, що

самих математичних знань, на жаль, не достатньо для вирішення того чи іншого наукового або прикладного завдання [1].

У закладах вищої освіти ще обов'язково потрібно отримати теоретичні і практичні навички з формалізації конкретного завдання, математичного опису необхідної інформації, послідовності математичного моделювання, що потребує освоєння методики математичного моделювання та використання отриманих моделей для аналізу, синтезу, розрахунку та оптимізації технічних систем [2, 3].

Сьогодні в науково-технічній та навчальній літературі здобувачам вищої освіти і фахівцям доводиться часто зустрічатися з різною інтерпретацією таких фундаментальних понять, як система, модель, моделювання. Подібна неоднозначність не свідчить про помилковість одних і правильність інших визначень термінів, а відображає залежність предмета розгляду як від галузі функціонування об'єкта, так і від службового призначення та його цілей [4, 5, 6].

В процесі опису та обґрунтування експериментів на сучасному етапі використовується статистична теорія планування експериментів, така теорія планування не досконала. Недолік виникає при оцінюванні точності цього опису, а значить, при вирішуванні питання про рівень відхилення експериментальних значень від розрахункових із аналітичного опису цих експериментів. Вирішують це питання за допомогою статистичних критеріїв розподілу відхилень.

У зв'язку з цим розроблені плани теорії планування, які не потребують статистичного аналізу опису, бо експериментальні і розрахункові дані співпадають точно при значеннях факторів з плану експеримента. Також в цьому нам допоможе таке математичне поняття як поліном. Поліном – це вираз або функція, яка складається зі змінної (або змінних) та коефіцієнтів, які множаться між собою та додаються або віднімаються. Кожен член поліному містить змінну, піднесену до цілого не від'ємного степеня. Поліноми використовуються в математиці для моделювання різних фізичних, економічних та інших явищ. Вони є важливою складовою алгебри та математичного аналізу.

Покажемо це на прикладі плану з двома кодovаними факторами x_1 та x_2 , які змінюють на трьох рівнях, що дорівнює (+1); 0; (-1) завдяки переходу від натуральних значень z_1 та z_2 за формулами:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{2z_1 - (z_{1max} + z_{1min})}{(z_{1max} + z_{1min})} \\ x_2 &= \frac{2z_2 - (z_{2max} + z_{2min})}{(z_{2max} + z_{2min})} \end{aligned} \quad (1)$$

де z_{max} та z_{min} – максимальне та мінімальне значення фактора z в інтервалі його змінювання.

При $z = z_{max}$ із (1) одержуємо (+1) при $z = z_{min}$ маємо (-1), а при середньому значенні

$$z = \frac{z_{max} + z_{min}}{2}$$

маємо (0).

Якщо формули (1) повернути відносно натуральних факторів, то знаючи кодovані фактори x можна перейти до натуральних z .

Тоді маємо план, що наведений у табл. 1.

Таблиця 1

№	1	2	3	4	5
x_1	+1	-1	+3	-1	0
x_2	+1	+1	-1	-1	0
y	y_1	y_2	y_3	y_4	y_0

Аналітичний опис для цього плану має вигляд поліному:

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{12}X_1X_2 \quad (2)$$

коефіцієнти котрого знаходять за формулами:

$$B_0 = y_0;$$

$$B_1 = 1/4(y_1 - y_2 + y_3 - y_4);$$

$$B_2 = 1/4(y_1 + y_2 - y_3 - y_4); \quad (3)$$

$$B_{11} = B_{22} = 1/8(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) - 1/2y_0;$$

$$B_{12} = 1/4(y_1 - y_2 - y_3 + y_4),$$

де y_0, y_1, \dots, y_4 – експериментальні значення величини (функції) що вивчається. Легко бачити, що при $x_1 = 0; x_2 = 0$ поліном дає значення $y = y_0$.

При $x_1 = +1; x_2 = +1$ із (2) і (3) маємо $y = B_0 + B_1 + B_2 + B_{11} + B_{22} + B_{12} = y_0 + 1/4(y_1 - y_2 + y_3 - y_4) + 1/4(y_1 + y_2 - y_3 - y_4) + 2(1/8(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) - 1/2y_0) + 1/4(y_1 - y_2 - y_3 + y_4) = y_1$

якщо $x_1 = -1; x_2 = -1$ маємо $y = y_4$,

також маємо $y = y_2$ при $x_1 = -1; x_2 = +1$ та $y = y_3$ при $x_1 = +1; x_2 = -1$.

Таблиця 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0
x_2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0
x_3	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	0
y	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_0

Таким чином, запропонований план експерименту може мати точний опис даних на рівнях плану і тому не потребує статистичного аналізу відхилень експериментальних і розрахункових значень.

Для випадку експериментів з трьома факторами $x_1; x_2; x_3$ розроблено план, наведений у таблиці 2.

Поліном точного опису цього плану має вигляд:

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + B_{11}x_1^2 + B_{22}x_2^2 + B_{33}x_3^2 + B_{12}x_1x_2 + B_{13}x_1x_3 + B_{23}x_2x_3 + B_{123}x_1x_2x_3.$$

Коефіцієнт цього поліному слід визначити за формулами:

$$B_0 = y_0;$$

$$B_1 = 3/24(y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8);$$

$$B_2 = 3/24(y_1 + y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 - y_7 - y_8);$$

$$B_3 = 3/24(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 - y_7 - y_8);$$

$$B_{11} = B_{22} = B_{33} = 1/24(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) - 1/3y_0;$$

$$B_{12} = 3/24(y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8),$$

$$B_{13} = 3/24(y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8),$$

$$B_{23} = 3/24(y_1 - y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 + y_7 - y_8).$$

Перевірка опису і плану показує, що при $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ маємо $y = y_0$, при $x_1 = x_2 = x_3 = +1$ маємо $y = y_1$, і при $x_1 = x_2 = x_3 = -1$ маємо $y = y_8$.

Решта значень $x_1; x_2; x_3$, які відповідають комбінаціям плану, дає експеримент також точний збіг результатів з опису і з плану.

У випадку чотирьох факторів $x_1; x_2; x_3; x_4$ план експериментів має вигляд висвітлений в таблиці 3.

Поліном точного опису цього плану має вигляд:

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + B_4x_4 + B_{11}x_1^2 + B_{22}x_2^2 + B_{33}x_3^2 + B_{44}x_4^2 + B_{12}x_1x_2 + B_{13}x_1x_3 + B_{14}x_1x_4 + B_{23}x_2x_3 + B_{24}x_2x_4 + B_{34}x_3x_4 + B_{1234}x_1x_2x_3x_4.$$

Таблиця 3

№	x_1	x_2	x_3	x_4	y	№	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	+1	+1	+1	+1	y_1	9	+1	+1	+1	-1	y_9
2	-1	+1	+1	+1	y_2	10	-1	+1	+1	-1	y_{10}
3	+1	-1	+1	+1	y_3	11	+1	-1	+1	-1	y_{11}
4	-1	-1	+1	+1	y_4	12	-1	-1	+1	-1	y_{12}
5	+1	+1	-1	+1	y_5	13	+1	+1	-1	-1	y_{13}
6	-1	+1	-1	+1	y_6	14	-1	+1	-1	-1	y_{14}
7	+1	-1	-1	+1	y_7	15	+1	-1	-1	-1	y_{15}
8	-1	-1	-1	+1	y_8	16	-1	-1	-1	-1	y_{16}
						17	0	0	0	0	y_{17}

Обчислювання коефіцієнтів поліному тут можливо виконувати за аналогічними формулами, що наведені для попередніх планів.

Висновки. Перед майбутніми спеціалістами різних спеціальностей все частіше постають завдання, які вимагають, окрім фахової кваліфікації, знання методів опрацювання результатів спостережень, планування експериментів, математичних методів моделювання та оптимізації процесів дослідження. Отже, сучасний фахівець повинен мати не тільки глибоку професійну підготовку, а й певний обсяг знань у галузі наукових досліджень, що передбачає засвоєння методологічних засад наукової праці, уміння збирати і опрацьовувати інформацію, розробляти програми наукових досліджень, аналізувати одержані результати та оформляти їх у вигляді наукового звіту.

Запропонований план експерименту може мати точний опис даних на рівнях плану і тому не потребує статистичного аналізу відхилень експериментальних і розрахункових значень.

Наведені у таблиці 1 і таблиці 2 плани можливо використовувати в процесі виконання лабораторних робіт з технічної механіки, деталей машин, інженерної та комп'ютерної графіки, а план з таблиці 3 під час виконання випускних робіт де досліджуються наприклад вплив різних пластифікаторів на рухомість бетонних сумішей та міцність бетону і т.ін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Баласанян Г.А. Організація та проведення наукових досліджень: Конспект лекцій з дисципліни для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня освіти по спеціальності – 144 Теплоенергетика. Одеса: ДУ «Одеська політехніка», 2021. 85 с.
2. . Вазинський С. Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень: навч. посіб. Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 260 с.
3. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. М34 Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. Київ: НАУ, 2017. 392 с.
4. Лапач С.М. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування»: КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2020. С 86. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e80b3665-5324-4155-a675-a1f0a11f9bdb/content>
5. Law A. M. W. D. Kelton. Simulation Modeling and Analysis. New York : McGraw-Hill Publishing Co, 2000. 3-rd edit. 560 p.
6. Hay D. C. Requirments Analysis: From Business Views to Architecture: Prentice Hall, 2003. 596 p.

REFERENCES:

1. Balasanyan G.A. (2021) *Orhanizatsiya ta provedennya naukovykh doslidzhen': Konspekt leksiy z dystsypliny dlya zdobuvachiv tret'oho (osvitn'o-naukovoho) rivnyia osvity po spetsial'nosti – 144 Teploenerhetyka*. [Synopsis of lectures on the discipline "Organization and conduct of scientific research" for students of the third (educational and scientific) level of education in the specialty. – 144 Thermal power engineering]. Odessa: State University Odessa Polytechnic. (In Ukrainian)
2. Vazhynskyi S. E., Shcherbak T. I. (2016) *Metodyka ta orhanizatsiya naukovykh doslidzhen'* [Methodology and organization of scientific research]. Sumy: A.S. Makarenko Sumy DPU. (In Ukrainian)
3. Pavlenko P. M., Filonenko S. F., Cherednikov O. M., Treytyak V. V. (2017) *Matematychnе modelyuvannya system i protsesiv* [Mathematical modeling of systems and processes]. Kyiv: teaching. manual NAU. (In Ukrainian)
4. Lapach S.M. (2020) *Teoriya planuvannya eksperymentiv: Vykonannya rozrakhunkovo-hrafichnoyi roboty: navch. posib. dlya stud. spetsial'nosti 131 «Prykladna mekhanika», spetsializatsiyi «Tekhnolohiya mashynobuduvannya»* [Theory of experiment planning: Performing calculation and graphic work teaching. manual for students specialty 131 "Applied Mechanics", specialization "Mechanical Engineering Technology"]. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e80b3665-5324-4155-a675-a1f0a11f9bdb/content>
5. Law A. M., Kelton W. D. (2000) Simulation Modeling and Analysis. New York : McGraw-Hill Publishing Co., 3-rd edit. 560 p. (USA)
6. Hay D. C. (2003) Requirments Analysis: From Business Views to Architecture. NJ: Prentice Hall. 596 p. (UK)