

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

«Підвищення якості механічної обробки деталей за рахунок вибору найбільш
раціональних методів математичного опису технологічного процесу»
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ДЕА-ІВс23мг.
спеціальності: 175 Інформаційно-вимірювальні
технології

_____ / Олександр ТАРАСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег КОНДРАТЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Олена ПРОКОПЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Євгеній КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

Реферат

Кваліфікаційна робота містить: 68 сторінок, 9 рисунків, 2 таблиці, 23 джерела літератури.

Метою дипломної роботи є знаходження оптимальних точок показників якості виготовлення деталі-валу, а також їх значення і показати з використанням оптимальних значень параметрів якості виготовлення валу з чотирма основними факторами.

Об'єктом дослідження є якість механічної обробки деталей.

Предметом дослідження є методи, що дозволять математично описати технологічний процес механічної обробки деталей при мінімальних часових і вартісних витратах.

Методи проведення дослідження: досягнення мети роботи засновується на комплексному використанні методів планування експерименту, математичного програмування, математичної статистики, моделювання.

Для даного центрального композиційного ортогонального планування другого порядку по чотирьох факторів у системі Maple була створена програма, що дозволяє вирішити задачу по визначенню максимуму точності виготовлення валу. Експериментально підтверджено, що при оптимальних показниках якості для знаходження оптимальних точок, і при мінімуму проведених експериментів в цих точках, що знайдені точки є точки максимуму точності виготовлення валу.

Наукова новизна полягає у тому, що набув подальшого розвитку метод лінійної алгебри, який був використаний при знаходженні екстремуму, а не метод градієнтів, що дозволяє знайти точність розрахунків і вимірів.

Ключові слова: планування експерименту, оптимальні точки, коефіцієнти регресії, коефіцієнти дисперсії, фактор, матриця планування.

Abstract

Qualification work contains: 68 pages, 9 figures, 2 tables, 23 sources of literature.

The purpose of the thesis is to find the optimal points of the quality indicators of the shaft part manufacturing, as well as their values and to show using the optimal values of the shaft manufacturing quality parameters with four main factors.

The object of study is the quality of machining parts.

The subject of the study is methods that will allow to mathematically describe the technological process of machining parts with minimal time and cost.

Research methods: achievement of the aim of the work is based on the integrated use of methods of experiment planning, mathematical programming, mathematical statistics, modeling.

For this central compositional orthogonal planning of the second order by four factors, a program was created in the Maple system to solve the problem of determining the maximum accuracy of shaft manufacturing. It has been experimentally confirmed that with optimal quality indicators for finding the optimal points, and with a minimum of experiments conducted at these points, the points found are the points of maximum shaft manufacturing accuracy.

The scientific novelty lies in the fact that the method of linear algebra, which was used to find the extremum, was further developed, rather than the method of gradients, which allows us to find the accuracy of calculations and measurements.

Key words: planning of the experiment, optimal points, regression coefficients, coefficients of variance, factor, planning matrix.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ОПТИМАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ.....	14
1.1. Методи планування і організації багатофакторного експерименту при дослідженні технологічних процесів.....	14
1.2. Системи контролю та управління технологічними процесами.....	23
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	24
РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	25
2.1 Планування експерименту	25
2.2 Джерела і вид представлення експериментальних даних.....	27
2.3 Ортогональні плани другого порядку.....	39
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	46
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ.....	48
3.1 Призначення та опис об'єкта механічної обробки.....	48
3.2 Вибір методів і засобів технічного контролю якості.....	51
3.3 Розрахунок оптимальних показників якості.....	53
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	65
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ВСТУП

Складні технологічні процеси зазвичай включають велику кількість факторів, які визначають хід процесу, їх складну взаємодію та наявність випадкових перешкод. Тому оптимізацію таких об'єктів можна ефективно здійснювати за допомогою експериментально-статистичних методів. Важливим аспектом є покращення ефективності експериментальних досліджень, спрямованих на отримання точної математичної моделі процесу за мінімальних часових і фінансових витрат. Одним з найбільш перспективних інструментів для вирішення цієї задачі є методи планування експериментів, які здатні значно підвищити ефективність досліджень.

Підвищення ефективності механічної обробки є найважливішим завданням сучасного машинобудування. Досягає найвищого рівня продуктивності обробки, забезпечуючи постійну якість виробництва деталей. Вирішити цю проблему в даний час можна шляхом вибору найбільш раціонального способу обробки деталей і встановлення оптимальних рівнів параметрів обробки, які гарантують максимальну продуктивність або мінімальні витрати.

З точки зору забезпечення якості актуальним є завдання обґрунтування остаточного методу обробки відповідальних поверхонь деталей, що визначають експлуатаційні властивості виробів в цілому.

Метою кваліфікаційної роботи є знаходження значень оптимальних точок. Крім того важливим є показати при мінімумі проведених експериментів в цих точках, що саме вони є точками максимуму.

Задачі, що вирішуються у магістерській кваліфікаційній роботі:

- розробити метод створення оптимальних комбінованих схем для багатоваріантних експериментів;

- розробити програмне забезпечення для рішення оптимізаційних задач при проведенні експерименту, що враховує багато факторів;
- розробити апаратні засоби для автоматизації побудови і проведення оптимальних планів експерименту.

Об'єктом дослідження є якість механічної обробки деталей.

Предметом дослідження є методи, що дозволять математично описати технологічний процес механічної обробки деталей при мінімальних часових і вартісних витратах.

Методи проведення дослідження: досягнення мети кваліфікаційної роботи засновується на комплексному використанні методів планування експерименту, математичного програмування, математичної статистики, моделювання, оптимізації. Використання програмування у системі Maple дозволило не тільки побудувати багатфакторну регресійну модель другого порядку, але оцінити значимість коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента при рівні значущості 0,05.

Наукова новизна роботи складається з того, що набуло подальшого розвитку:

- вирішення задачі підвищення ефективності експериментальних досліджень, які спрямовані на визначення максимуму;
- вирішення важливої практичної задачі визначення параметрів якості точності виготовлення деталі;
- удосконалено метод знаходження екстремуму за рахунок використання методів лінійної алгебри, а не градієнтів, які зазвичай частіше використовуються, але дають недостатньо точні рішення;
- удосконалено підхід до вирішення задачі побудови оптимальних ортогональних планів, що включає в себе нові ефективні методи вибору оптимального за вартістю реалізації плану експерименту, класифікації і переліку типових варіантів оптимальних планів. Даний підхід дозволяє

отримувати математичні моделі технологічних об'єктів при мінімальних часових і вартісних витратах;

- удосконалено програму за допомогою Maple, що дозволяє вирішити задачу по визначенню максимальної точності виготовлення деталі.

Практична значимість кваліфікаційної роботи полягає в тому, що запропоновано новий підхід до вирішення задачі математичного опису об'єктів. Запропонований підхід і розроблені програмно – апаратні засоби можна ефективно використовувати для моделювання різних об'єктів, у тому числі якості механічної обробки деталей, які дозволяють здійснення на них активного експерименту. Визначено оптимальні показники якості для знаходження оптимальних точок, і показано при мінімумі проведених експериментів в цих точках, що знайдені точки є точки максимуму.

Необхідність усунути або, принаймні, зменшити систематичні помилки в сільськогосподарських дослідженнях шляхом рандомізації під час проведення експериментів, призвела до того, що було встановлено, що процедура планування спрямована не тільки на зменшення дисперсії оцінюваних параметрів, але і на рандомізацію супутніх, спонтанно виникаючих факторів. В результаті чого вдалося усунути упередженість в оцінках. Доцільність створення та початкові положення спеціальної теорії планування експерименту вперше були сформульовані в Англії на агробіологічне станції в Ротамстеде в ході вирішення практичних завдань з рослинництва в кінці XIX століття. Серйозний внесок у становлення теорії вніс відомий англійський математик Ренальдо Фішер (1900 – 1962 р.р.) книга якого (RA Fisher. The Design of experiments. Oliver and Boyd, Edinburgh, 1935). Поклала початок новому напрямку – планування експериментів (вірніше його частини – дисперсійного аналізу). Надалі Фішер розробив також факторне планування, яке заклало основу теорії статистичного аналізу, дало початок розвитку науки з планування та аналізу порівняльних експериментів [3, ст.6].

З 1918 року Фішер Р. розпочав свою знаменну серію робіт на агробіологічній станції Рокемстед в Англії. А вже у 1935 році з'явилася його монографія «Design of Experiments» («Планування експериментів»), яка дала назву цілому науковому напрямку.

Перше детальне математичне дослідження блок-схем було проведено у 1939 році. Потім відомі вчені Р. Боуз та інші узагальнили ці плани і розробили теорію частково збалансованого напівблочного планування. З тих пір вивчення блок-схем проводилося експериментаторами, експертами з комбінованого аналізу та привернуло велику увагу науковців.

В 1942 році А. Кішен задумав провести експеримент з латинським кубом, який став подальшим розвитком теорії латинського квадрата. Потім Фішер самостійно опублікував інформацію про ортогональні латинські куби. Незабаром після цього, в 1946 році, Р. Рао досліджував їх комбінаційні характеристики. Подальший розвиток теорії латинського квадрата було дано в роботі Х. Манна (1947 - 1950 pp.).

Дослідження Р. Фішера поклали початок першому етапу розвитку методів експериментального планування. Фішер розробив метод факторного програмування. Він також запропонував просту схему розрахунку методу. Поширеними стали факторіальні плани. Однією з характеристик факторних експериментів є те, що велика кількість експериментів повинна бути встановлена одночасно. У 1945 р. Д. Фінні ввів у факторні експерименти дробове повторення. Це дає змогу зменшити кількість експериментів і відкриває шлях для ініціатив технологічного планування. Ще одна можливість скоротити кількість необхідних експериментів була запропонована в 1946 р. Р. Плакеттом і Д. Берманом, які ввели насичену факторіальну схему. Х. Хотеллінг запропонував у 1941 році використання статичних розподілів і градієнтів для знаходження екстремальних значень на основі експериментальних даних. Наступний важливий етап — впровадження принципу послідовного покрокового проведення дослідів. Цей принцип був запропонований у 1947

році. Фрідмана та Л. Севіджа, що дозволяє розширити експериментальне визначення екстремальних значень. Для створення сучасної теорії планування експерименту бракує ланки – формалізації об'єкта дослідження. Це посилення з'явилося в 1947 році. Після створення Н. Кібернетика Вінера. Велику роль у плануванні відіграє кібернетична концепція «чорної скриньки». У 1951 р. американські вчені Дж. Бокс і К. Вільсон розпочали новий етап розвитку експериментального планування. Він представляє ідею послідовного експериментального визначення оптимальних умов методом найменших квадратів, оцінюючи статичні коефіцієнти розподілу, рухаючись уздовж градієнта та знаходячи інтерполяційні поліноми в наступній області, з практичними пропозиціями: екстремальні значення функції відгуку (майже стаціонарна область).

1954-1955 рр. Л. Ш. Бокс, потім П. Юл. показали, що план експерименту може бути використаний для дослідження фізико-хімічних процесів, якщо апріорно висловлена одна або декілька можливих гіпотез. Цей напрямок отримав розвиток у роботах Н. П. Клепікова, С. Н. Соколова і В. В. Федорова в галузі ядерної фізики. Третій етап розвитку теорії експериментального планування почався в 1957 році, коли Бокс застосував свої методи в промисловості. Цей підхід отримав назву «еволюційне планування». У 1958 р. Г. Шиффа запропонував новий плановий експериментальний метод дослідження діаграм фізичного та хімічного складу - властивість, названу «простою решіткою». Розвиток теорії радянської експериментальної програми відображено в роботах В. В. Налімова, Ю. П. Адлера, Ю. В. Грановського і Е. В. Маркової.

Основи планування експерименту за Рональдом Фішером.

Метод планування експериментів був розроблений Рональдом А. Фішером у його основоположній праці «Планування експериментів» (1935). Наприклад, він описує, як перевірити гіпотезу про те, що жінка може визначити, молоко чи чай наливо в чашку спочатку лише за смаком. Це звучить просто, але

це допомагає вченим прояснити найважливіші ідеї для планування експериментів.

Зростання обсягів експериментальних досліджень зробило актуальною постановку питання про ефективність експерименту: поява ЕОМ відкрило дорогу для реалізації таких схем експериментування, які різко підвищили його К.К.Д. Виникли математична теорія експерименту як її частина. Проф. Налімов В. Вдає наступне визначення планування експерименту: «... планування експерименту – це оптимальне управління експериментів при неповному знанні механізму явищ. Експерименти Обачного ставляться невеликими серіями по заздалегідь складеним алгоритмом, оптимальному в деякому суворо сформульований сенсі. Після кожної невеликий серії дослідів проводиться обробка результатів спостережень і приймається суворо обґрунтоване рішення про те, що робити далі. Планування експерименту можна розглядати як один із напрямів кібернетики.

Сучасне планування експерименту було закладено Боксом і Вілсоном в 1951 р., які доповнили факторний планування обґрунтованим рухом в область оптимуму й описали його у вигляді полінома (ортогональні плани). Принципи рототабельного планування сформулювали Бокс і Хантер в 1957 р. У 1959 р. Саттерзвайтом був запропонований метод випадкового балансу. У цей же час в США стали з'являтися роботи пов'язані з D - оптимальним плануванням (Кіфер та його учні) [3, ст.7].

Розвиток планування експерименту можна віднести до 1960 р. і пов'язано воно з іменами Налімова В. В., та його учнями і дослідниками. Починаючи з 1964 р., підсумки робіт з планування експерименту обговорюються на всесоюзних конференціях. Остання IV Всесоюзна конференція (1975 р.), показала значні успіхи в розвитку теорії планування експерименту. Серед наших співвітчизників істотну роль в становленні вітчизняної школи в галузі теорії ПЕ і її практичного застосування зіграли Ю.П. Адлер, Є.В. Маркова, В.В. Налімов, В.В. Федоров та інші вчені.

Експеримент завжди служив засобом пізнання навколишнього світу, критерієм гіпотез і теорій. Довгий час вважалося, що вибір стратегій експерименту та його реалізація повністю визначаються досвідом та інтуїцією дослідника.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ОПТИМАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ

1.1 Методи планування і організації багатофакторного експерименту при дослідженні технологічних процесів

Підвищення матеріального і культурного рівня життя народу України потребує соціально – економічного розвитку суспільства та підвищення ефективності виробництва на базі науково – технічного прогресу. Вирішити проблему підвищення якості продукції можна за рахунок широкого впровадження нових прогресивних технологічних процесів та систем управління цими процесами. Таким чином, подальше підвищення якості продукції є державною проблемою [5].

Для підвищення ефективності досліджень велике значення має розробка стратегії оптимального планування експерименту, значний внесок в розвиток якої внесли роботи Налімова В.В., Федорова В.В., Круга Г.К., Адлера Ю.П., Маркової О.В., Горського В.Г., Єрмакова С.М., Денісова В.І., Голікової Т.І., Лецького Е.К., Талалая О.М., Hartley Н.О., Kiefer J. та інші. Ці задачі успішно вирішуються шляхом створення систем автоматизації науково – технічних експериментів. Розробка таких систем дозволяє скоротити терміни і витрати на проведення експериментальних досліджень, звільнити експериментатора від рутинних операцій при виконанні розрахунків і дасть можливість провести складні експерименти. При цьому важливою задачею є створення проблемно – орієнтованого математичного забезпечення для рішення задач механізації експериментів. [5]

Характерно, що відомі стратегії і методи планування експерименту мають обмеження на кількість факторів, що враховуються, складну алгоритмізацію, не мають загального підходу, в багатьох випадках характеризуються

суб'єктивністю дослідів, необхідних для побудови адекватної математичної моделі, не враховують вартості дослідів плану експерименту. Все це вказує на необхідність рішення такої важливої і актуальної задачі, як розробка ефективних методів і програмно – апаратних засобів для моделювання складних об'єктів.

Найважливішим завданням методу обробки інформації, отриманої в ході експерименту, є встановлення математичної моделі досліджуваного явища, процесу, об'єкта. Його можна використовувати для аналізу процесів і проектування об'єктів. Якщо цілеспрямовано проводити активні експерименти, то можна отримати дуже наближену математичну модель. Іншим завданням, яке має справу з інформацією, отриманою під час експериментів, є завдання оптимізації, тобто знаходження комбінації впливаючих незалежних змінних, у якій обраний показник оптимальності приймає екстремальне значення. План дослідів — це сукупність даних, що визначають кількість, умови та послідовність дослідів. Планування експерименту — вибір плану експерименту, який відповідає заданим вимогам і являє собою комплекс дій, спрямованих на формулювання стратегії експерименту (від отримання апріорної інформації до отримання здійсненої математичної моделі або визначення оптимальних умов).

У процесі вимірювання, подальшої обробки даних і формалізації результатів у математичні моделі виникають помилки, і частина інформації, що міститься у вихідних даних, втрачається. Використання методів планування експерименту дозволяє визначити неточності математичної моделі та судити про її адекватність. Якщо точність моделі недостатня, то за допомогою методів планування експерименту можна модернізувати математичну модель додатковими експериментами без втрати попередньої інформації та з мінімальними витратами. Мета планування експерименту — знайти умови і правила проведення дослідів, за яких можна з найменшими затратами праці

отримати достовірну і достовірну інформацію про об'єкт і подати цю інформацію в компактному і зручному вигляді. Кількісна оцінка точності.

Проведений аналіз методів планування і організації багатофакторного експерименту при дослідженні технологічних процесів. Він показав, що при вивченні складних технологічних об'єктів, і особливо при проведенні наукових досліджень, все більше значення мають математичні моделі, що адекватно представляють поведінку об'єкта в широкому діапазоні зміни вхідних факторів. Структуру таких моделей часто вдається вивести на основі деяких гіпотез про механізм явищ, що відбуваються в об'єкті. При цьому моделі представляються у вигляді диференціальних і інтегральних рівнянь або їх рішень в явному вигляді. Однак в цьому випадку значення деяких параметрів можуть бути визначені лише на основі експериментальних даних.

Широке застосування методів планування експерименту стримується рядом обмежень, які накладаються при рішенні задач: розглядають задачі з невеликим числом факторів, досліди вважають рівноцінними, не враховують вартість зміни рівнів факторів.

У технологічних дослідженнях багато задач, наприклад, пошук багатокомпонентних матеріалів, розробка рецептур їх отримання, вибір оптимальних режимів технологічних процесів, є типовими комбінаторними задачами. Вони пов'язані з великим числом факторів, рівні яких можна інтерпретувати як множини дискретних відособлених елементів. Найбільш ефективними в цьому випадку є комбінаторні методи побудови планів експерименту. Оскільки повний перебір комбінацій в багатофакторних ситуаціях реалізувати неможливо, то головна задача планування експерименту зводиться до оптимального скорочення перебору варіантів. Використання комбінаторних планів дозволяє оптимально скоротити і істотно зменшити витрати машинного часу. Розвиток теорії комбінаторних планів породжує нові методи і підходи для побудови і дослідження нових технологічних об'єктів.

Досі відсутній загальний підхід до побудови оптимальних комбінаторних планів експерименту.

Наука планування являє собою систему знань, яка охоплює сутність, методологію, методику та організацію процесу планування.

Суть планування полягає у формулюванні та обґрунтуванні цілей, виборі оптимальних методів і засобів для їх досягнення, а також у забезпеченні ефективного використання всіх необхідних ресурсів і встановленні їхньої взаємодії для реалізації визначених завдань.

Сам процес планування проходить чотири етапи:

- 1) Розробку загальних цілей;
- 2) Визначення конкретних цілей на даний період з послідуною їх деталізацією;
- 3) Визначення шляхів і способів досягнення цілей;
- 4) Контроль за процесом досягнення поставлених цілей шляхом співставлення планових показників з фактичними та коригування цілей.

Методологія планування — це система теоретичних положень, загальних закономірностей та наукових принципів, які використовуються для розробки, обґрунтування та опису планів відповідно до сучасних вимог ринку, підтверджених передовим досвідом.

Планування сприяє перетворенню «ірраціональності на раціональність», забезпечуючи більшу узгодженість інтересів, передбачуваність та взаємодію в системі «економіка – людина – природа».

Матеріальне виробництво та виробничі відносини, які визначають суспільне буття людей, є основою суспільства. У межах суспільного виробництва провідну роль відіграє його ключова сфера — матеріальне виробництво, яке є основним об'єктом науки планування.

Процес планування діяльності підприємств охоплює різні аспекти, зокрема: виробництво та реалізацію продукції, її собівартість, забезпечення трудовими, матеріальними й фінансовими ресурсами, фінансові результати

діяльності, фінансовий стан підприємства та його інвестиційну активність. Усі ці елементи виступають об'єктами планування, які розглядаються як цілісна система, що дозволяє розкрити предмет планування.

Планування є процесом підготовки рішень щодо цілей, способів та методів їх досягнення через цілеспрямовану оцінку альтернативних варіантів дій у прогнозованих умовах. Оскільки прийняття таких рішень завжди пов'язане з використанням ресурсів, ресурси підприємства значною мірою виступають основним предметом планування.

Як складова економічної науки, планування базується на загальних взаємопов'язаних методах наукових досліджень, таких як аналіз і синтез, дедукція й індукція. До нього також застосовуються спеціалізовані методи, включаючи системний, конкретно-історичний і комплексний підходи, а також експеримент, моделювання та методи спеціальних досліджень.

Метод визначає, як має реалізовуватися наукова й практична діяльність людей у прикладній сфері науки. Методи науки планування формують систему різноманітних засобів і прийомів для вивчення та узагальнення явищ реальності, пов'язаних із плануванням соціально-економічних об'єктів.

Одним із методів дослідження є метод системного підходу та раціонального вибору, який забезпечує аналіз кількісних і якісних характеристик можливих процесів із позицій системного мислення.

Цей метод включає:

1. Розгляд систем планування виробництва як цілісних утворень із власними законами розвитку, з урахуванням усіх аспектів об'єкта управління — економічного, соціального, технічного, організаційного, екологічного та психологічного.

2. Можливість поділу системи на підсистеми для дослідження їхньої взаємодії, оскільки кожна підсистема впливає як на інші підсистеми, так і на всю систему загалом.

Такий підхід дозволяє виявити закономірності, зв'язки між підсистемами, їхню взаємодію та ієрархію. За системного підходу кожен об'єкт планування розглядається як сукупність взаємозалежних елементів, об'єднаних для досягнення спільної мети, із власними законами розвитку.

Конкретно-історичний підхід, як метод дослідження в науці планування, передбачає аналіз відносин планування як процесів, що перебувають у стані розвитку та змінюються під впливом різноманітних чинників. Усі процеси розглядаються у взаємозв'язку з історичними умовами, характерними для конкретної країни.

Комплексний підхід є ширшим поняттям порівняно із системним, оскільки він ґрунтується на його принципах. Цей підхід передбачає:

- поєднання методів дослідження не лише однієї, а й багатьох наук;
- аналіз усієї сукупності цілей планування на різних рівнях;
- вивчення проблем планування з урахуванням часових перспектив та інших аспектів.

Експеримент є методом дослідного вивчення або уточнення взаємозв'язків між соціально-економічними явищами, який використовується для перевірки запланованих рішень.

У плануванні моделювання застосовується:

- для створення проектів систем без їх реалізації у реальному житті;
- для вдосконалення існуючих систем у випадках, коли проведення експерименту на реальній системі неможливе або економічно недоцільне через високі витрати;
- у ситуаціях, коли експеримент у реальних умовах може призвести до руйнування системи.

Моделювання не пропонує готового рішення, але дає можливість обрати не оптимальний, а практично здійснений і раціональний варіант планового процесу. Для цього використовуються різні види моделей: графічні, числові, логічні, табличні та інші.

Методи спеціальних досліджень передбачають вивчення соціальних аспектів для аналізу процесів, які неможливо оцінити кількісно. Вони включають анкетування, інтерв'ю та інші подібні підходи.

Місце науки планування визначається її взаємозв'язками з іншими науками, такими як економічна теорія, галузеві економіки, економічна географія, правознавство, статистика, облік, фінанси та кредит, технічні та природничі науки, соціологія, психологія, математика, кібернетика й інформатика.

Автоматизація експериментальних досліджень із застосуванням ЕОМ охоплює вибір вимірювальних засобів, які забезпечують необхідну точність і швидкодію, а також розробку алгоритмічного та програмного забезпечення. Вона набуває особливої значущості під час пошуку якісно нових рішень, впровадження принципово нових методик дослідження або докорінної зміни існуючих підходів. Ключовим елементом автоматизованого експерименту є високорозвинене алгоритмічне та програмне забезпечення, яке підтримує моделювання та обробку інформації.

Аналіз методів ідентифікації складних об'єктів, експериментальних планів для побудови поліноміальних моделей першого та другого порядку, а також пакетів прикладних програм для автоматизації планування експерименту дозволив визначити основну наукову задачу — розробку методів і програмно-апаратних засобів для моделювання технологічних процесів, спрямованих на підвищення ефективності їх дослідження. Визначено конкретні завдання, які необхідно вирішити для досягнення мети дослідження.

В якості основних методів планування, що вживають на різних етапах дослідження, використовують:

- планування відсіваючого експерименту, основне значення якого виділення зі всієї сукупності чинників групи істотних факторів, що підлягають подальшому детальному вивченню;

- планування експерименту для дисперсійного аналізу, тобто складання планів для об'єктів з якісними чинниками; планування регресійного експерименту, що дозволяє отримувати регресійні моделі (поліноміальні та інші); планування екстремального експерименту, в якому головне завдання – експериментальна оптимізація об'єкту дослідження; планування при вивченні динамічних процесів і так далі Ініціатором вживання планування експерименту є Рональд А. Фішер, інший автор відомих перших робіт – Френк Йетс. Далі ідеї планування експерименту формувалися в працях Дж. Боксу, Дж. Кифера. У нашій країні - в працях Г.К. Круга, Е.В. Марков і ін.

Сьогодні більшість методів планування експерименту вже закладені в спеціалізованих пакетах та широко представлені на ринку програмних продуктів, як то: Statgraphics, Statistica, SPSS, SYSTAT і ін.

У експериментальних дослідженнях часто виникає ситуація, коли одночасне вивчення факторів є неможливим або не бажаним. В такому випадку фактори вивчаються послідовно. Плани для вирішення таких завдань, зазвичай, будуються на основі стандартних комбінаторних конфігурацій, таких як латинські квадрати, блок-схеми та інші подібні структури. Планування експерименту для вивчення послідовних впливів є важливим і цікавим напрямком теорії, який має значну практичну цінність, де комбінаторні плани та методи відіграють ключову роль. Попри велику кількість практичних завдань з послідовним застосуванням факторів, цей розділ теорії експерименту ще недостатньо розроблений і висвітлений в науковій літературі.

У багатьох галузях досліджень важко точно відтворити результати вимірювань. Натомість порівняння в умовах, які легше відтворити, зазвичай є більш зручним і має перевагу. Часто для порівняння використовуються стандартні або традиційні умови, які виступають як базові.

Існує математична теорія, яка досліджує наслідки розподілу одиниць за допомогою різних механізмів, таких як таблиці випадкових чисел або *рандомізовані* пристрої, наприклад, гральні карти або кості. За умови, що

вибірка є адекватною, ризики, пов'язані з випадковим розподілом (наприклад, недостатньо репрезентативна вибірка в опитуванні чи значний дисбаланс у ключових характеристиках між групами умов і контрольними групами), можна обчислити та знизити до прийняттого рівня. Довільний не означає хаотичний, тому важливо забезпечити правильне використання відповідних випадкових методів.

Зміни у вимірюваннях можуть відбуватися як при повторних вимірюваннях, так і між реплікованими об'єктами або процесами. Багаторазові вимірювання повторюваних елементів необхідні для визначення величини похибки.

Блокування — це організація експериментальних елементів у групи (блоки), які є схожими між собою. Це дозволяє зменшити відомі, але не пов'язані з досліджуванним фактором джерела відмінностей між підрозділами, що в свою чергу сприяє підвищенню точності оцінки коливань, які вивчаються.

Ортогональність стосується таких порівнянь (контрастів), які можуть бути виконані ефективно. Контрасти можуть бути представлені у вигляді векторів, і групи ортогональних контрастів є некорельованими та незалежно розподіленими, якщо дані відповідають нормальному розподілу. Завдяки цій незалежності кожен ортогональний контраст надає унікальну інформацію, яка не перекривається з іншими. Якщо є умови T і $T-1$ ортогональних контрастів, то всю інформацію, яку можна отримати в результаті експерименту, можна витягти з різних контрастів.

Використання *факторіального експерименту* замість дослідження факторів окремо є ефективним для оцінки наслідків та можливих взаємодій між кількома факторами (незалежними змінними). Аналіз планування експерименту побудований на основі аналізу різниць, збору моделей, у яких спостережувана різниця розподіляється на компоненти, завдяки різним факторам, що оцінюються та/або тестуються [5].

1.2 Системи контролю та управління технологічними процесами

Сучасне виробництво відзначається активним впровадженням автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами, а також комп'ютеризацією та інтелектуалізацією. Подальше підвищення ефективності виробництва безпосередньо пов'язане з моделюванням як окремих елементів, так і всього виробничого процесу. Моделювання дозволяє раціонально організовувати технологічні операції, знаходити оптимальні режими їх функціонування та отримувати нові знання про об'єкт без ризику безпосереднього контакту з ним. Модель є умовним відображенням об'єкта, що досліджується, в якому адекватно відображаються його внутрішні зв'язки. Моделювання вимагає формалізованого опису об'єкта за допомогою символів, зрозумілих для комп'ютера.

Дослідження виробництва полягає у встановленні умов для реалізації технологічних процесів з метою забезпечення необхідного рівня якості продукції при мінімальних витратах. Основними завданнями, які потрібно вирішити, є підвищення ефективності виробництва, збільшення продуктивності праці, оптимізація виробничих програм за обмежених ресурсів, поліпшення умов праці та культури виробництва тощо. Складність цих завдань полягає в тому, що досягнення таких цілей, як підвищення якості продукції та зменшення витрат на її виготовлення, часто вимагає техніко-економічного компромісу. Окрім того, технологічні процеси виготовлення продукції з заданими споживчими властивостями часто мають альтернативи: один і той самий продукт можна отримати за допомогою різних організаційних і технологічних підходів.

У сучасних умовах жорсткої конкуренції на споживчому ринку, інтенсифікації виробництва та постійному зростанні потужностей енергетичних і інформаційних потоків прийняття рішень відбувається в умовах обмеженого часу. Вартість помилки в оцінці виробничої ситуації, особливо в серійному та масовому виробництві, стає неприпустимо високою. Для того, щоб уникнути або значно зменшити ймовірність таких помилок, керівництво підприємства

повинно приймати рішення, спираючись не лише на знання виробничих процесів, але й на прикладні методи з галузі математичного моделювання, дослідження операцій, системного аналізу, теорії прийняття та оптимізації рішень.

Аналіз виробничих процесів показує, що, незважаючи на їх різноманітність, вони мають кілька спільних характеристик. Найважливішими з них є такі: структурна складність і багатофакторність; ієрархічність, яка проявляється у вертикальній підпорядкованості різних технологічних етапів та структурних підрозділів; тісний інформаційний та функціональний зв'язок між елементами ієрархії; чітка функціональна роль як окремих технологічних операцій, так і всього виробничого процесу загалом; динамізм, що виявляється в постійних змінах у технологічному середовищі, як детермінованих (визначених), так і стохастичних (випадкових); а також регулювання і саморегулювання, що дозволяє підтримувати параметри технологічних процесів в межах заданих меж.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

На основі досліджень, проведених у першому розділі встановлено, що однією з важливих задач є розробка проблемно-орієнтованого математичного забезпечення для вирішення завдань механізації експериментів. Порівнюючи характеристики різних систем, можна зробити висновок, що виробничий процес є технічною або технологічною системою (ТС), в якій під керівництвом оператора реалізується функціональна взаємодія засобів та предметів виробництва для виконання заданих технологічних операцій. Отже, дослідження ТС доцільно проводити із застосуванням перевірених математичних методів багатофакторного аналізу, моделювання та оптимізації систем і процесів, а також теорії автоматизованих систем управління тощо.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВИ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Планування експерименту

Планування експерименту – це процес визначення кількості та умов проведення експериментів, які є необхідними та достатніми для досягнення заданої точності в дослідженнях.

Існують два основні підходи до планування експерименту: класичний, коли кожен фактор змінюється по черзі до досягнення часткового максимуму при фіксованих значеннях інших факторів, та статистичний, при якому змінюються багато факторів одночасно. Ключовими аспектами є: мінімізація кількості дослідів, одночасне варіювання всіх параметрів, використання математичних методів, які формалізують дії експериментатора, а також вибір чіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожного етапу експериментів.

Існує кілька типів експериментальних планів, серед яких: план дисперсійного аналізу, план відбору суттєвих факторів, багатофакторний аналіз, план для отримання поверхні відгуку, плани для динамічних задач планування, плани для вивчення механізмів явищ, а також плани для побудови діаграм «склад — властивість» та «склад — стан».

Експериментальні дослідження є основним джерелом отримання надійних даних про об'єкти реального світу. Вони проводяться з метою вибору оптимальних технологічних режимів або налаштування параметрів систем, оцінки рівня відповідності заданим вимогам до виробів, виявлення закономірностей функціонування, аналізу впливу факторів на показники систем тощо. Натурні дослідження властивостей технічних засобів або складних моделей потребують великих витрат ресурсів, що вимагає особливої уваги до раціональної організації експериментальних досліджень таких об'єктів.

Експериментальні дані отримуються через пасивне спостереження або активний експеримент. При пасивному спостереженні інформація збирається шляхом фіксації необхідних даних під час звичайного функціонування об'єкта. В активному експерименті здійснюється навмисний вплив на об'єкт згідно з попередньо розробленим планом.

Активний експеримент дає змогу розширити сферу дослідження, чітко виявити закономірності функціонування та зменшити витрати ресурсів на проведення дослідження. Однак організація та проведення активного експерименту є більш складними, ніж пасивного. Також необхідно враховувати принципові обмеження при проведенні активних експериментів, пов'язані з потенціалом об'єкта, а також неможливість їх здійснення для недоступних об'єктів.

Планування експериментів (ПЕ) охоплює широкий спектр питань, починаючи від урахування специфічних особливостей об'єктів дослідження до більш загальних концептуальних проблем. Далі будуть розглянуті основні завдання планування, які вивчаються в рамках спеціальної наукової дисципліни – теорії планування експерименту (ТПЕ). На сьогодні ТПЕ є окремим науковим напрямом, який активно застосовується в складних наукових та технічних експериментальних дослідженнях. Теорія базується на методах математичної статистики, лінійної алгебри, комбінаторики та інших математичних дисциплін.

Методи теорії планування експериментів орієнтовані на розробку оптимальних планів для проведення експериментів, що дозволяє зменшити кількість об'єктів дослідження, при цьому забезпечуючи задану точність і достовірність результатів, а також отримання максимального обсягу корисної інформації з досвідчених даних. Однією з складових ТПЕ є вивчення методів обробки результатів експерименту, проведеного за визначеним планом, а також аналіз властивостей отриманих оцінок показників якості об'єкта. Дані, отримані за допомогою ТПЕ, часто стають основою для застосування інших математичних методів, таких як градієнтні методи оптимізації.

Наявність формальної теорії планування експерименту не скасовує потреби у глибокому розумінні фізичних основ процесів, що відбуваються в об'єкті дослідження, а також факторів, які на нього впливають. Ці знання є необхідними на етапі розробки плану експерименту, а також під час аналізу та інтерпретації отриманих результатів.

2.2 Джерела і вид представлення експериментальних даних

Експериментальні дослідження подій і процесів ґрунтуються на спостереженнях, під час яких фіксуються різні факти як штучного, так і природного походження.

Джерела експериментальних даних (ЕД) включають:

- результати спостережень за реальними об'єктами та процесами, що відбуваються в них. Спостереження можуть бути проведені під час випробувань або в процесі звичайної експлуатації;
- дані моделювання об'єктів, зокрема результати імітаційного моделювання;
- технічні, економічні та наукові звіти й огляди, які публікуються в різноманітних виданнях, наприклад, інформація про результати випробувань або характеристики однотипних пристроїв від різних виробників;
- результати опитувань фахівців та інші подібні джерела.

Обробка ЕД, одержуваних від різних джерел, має багато спільного. Проте організація збору та інтерпретації ЕД специфічна для конкретної предметної області.

Однією з основних форм є символна, яка передбачає подання даних у вигляді чисел, двійкових значень або тексту. Для визначення значень відповідних величин використовуються різні шкали вимірювання. Описові (якісні) характеристики вимірюються за допомогою номінальних і порядкових шкал. Номінальні шкали дозволяють лише групувати об'єкти за певною

ознакою, що спільна для них, без можливості ранжувати ці об'єкти. Порядкові шкали дають змогу впорядковувати дані за ознакою «більше», «менше», «дорівнює», проте не вказується, на скільки одне значення перевищує або поступається іншому.

Кількісні властивості відображаються числами у відносних або абсолютних шкалах вимірювань. У відносних шкалах точки початку і масштаб вимірювань мають умовний характер.

Кількісні характеристики (параметри) можуть бути представлені як дискретними, так і безперервними величинами. Дискретні параметри можуть приймати лише окремі значення, без можливості проміжних величин між ними, хоча часто вони мають велику кількість допустимих значень. Безперервні параметри, в свою чергу, можуть набувати будь-яких значень у межах допустимого діапазону. Під час обробки безперервних величин їх зазвичай округлюють і представляють за допомогою обмеженого числа розрядів. На практиці експериментальні дані зазвичай відображають з такою розрядністю, що забезпечує відносну похибку не більше одиниць або десятих відсотка.

Експериментальні дані (ЕД) можуть бути представлені не лише в символній формі, але й у різних інших форматах, таких як графічні (графіки, осцилограми, штрихові малюнки, кольорові зображення або напівтонові малюнки) та аудіо-дані. Ці дані можуть бути оброблені безпосередньо або спершу перетворені в числову форму. Далі буде розглядатися тільки числове подання даних, оскільки це універсальний і широко використовуваний спосіб представлення інформації, яка кількісно характеризує параметри об'єктів і процесів. При цьому параметри вважаються безперервними величинами, якщо не вказано інше. Параметри можуть залежати від часу або бути незалежними від нього.

Результати спостережень носять детермінований або випадковий характер. Більшість подій і процесів в автоматизованих системах можна вважати випадковими.

Одна з важливих особливостей задач оцінювання параметрів автоматизованих систем обробки інформації та управління (АСОІУ) полягає в наявності цензурування, яке означає відсутність деяких елементів у результатах спостережень. Цензурування може виникати з різних причин, таких як різночасність початку і закінчення роботи окремих пристроїв або через те, що час завершення незначної події перевищує встановлені межі спостереження.

Основні показники, такі як точність і шорсткість, мають імовірнісний характер і не можуть бути виміряні безпосередньо. Для їх оцінки використовуються непрямі методи, що ґрунтуються на реєстрації відповідних первинних параметрів і подальшій обробці зібраних даних за допомогою спеціальних математичних технік. Наприклад, тривалість роботи до відмови деякої групи однотипних пристроїв можна розглядати як множину можливих випадкових значень показника "час до відмови". Для оцінки цього показника необхідно враховувати його характеристики як випадкової величини, зокрема закон розподілу, моменти розподілу або інші параметри, які слід визначити.

Отже, кожен зареєстрований даний є конкретним проявом певної закономірності. В загальному вигляді мета обробки експериментальних даних полягає у виявленні властивості цим даним закономірності через аналіз кожного окремого випадку та представлення цієї закономірності в кількісному вираженні.

Основною метою обробки експериментальних даних є оцінка значень показників якості засобів, комплексів чи системи в цілому. На етапі розробки така оцінка сприяє обґрунтованому прийняттю рішень щодо побудови об'єктів, перевірці показників на відповідність вимогам, визначенню важливих факторів, що впливають на функціонування об'єктів, а також виявленню причин невідповідностей вимогам.

На стадії експлуатації обробка експериментальних даних використовується для вирішення низки управлінських завдань, таких як:

- коригування режимів роботи об'єкта;
- зміна порядку обробки інформації;
- обґрунтування необхідних даних для модернізації об'єкта (зміна конфігурації технічних і програмних засобів);
- адаптація об'єкта до нових умов функціонування;
- стискання та узагальнення інформації про функціонування об'єкта для подальшого використання в дослідженнях аналогічних об'єктів і обґрунтування для створення нових систем;
- виявлення закономірностей функціонування об'єкта в умовах конкуренції, встановлення залежностей між параметрами об'єкта, зовнішнього середовища та показниками якості;
- застосування виявлених закономірностей для пошуку оптимальних значень параметрів при синтезі нових систем та спрощеного опису об'єкта в моделі суперсистеми;
- визначення ключових параметрів системи та зовнішнього середовища;
- вивчення типології об'єктів, таких як розпізнавання образів та класифікація;
- прогнозування розвитку об'єктів для організаційного та технологічного управління.

Водночас, слід враховувати, що результати обробки експериментальних даних не можуть гарантувати абсолютну достовірність опису невідомих показників або закономірностей. Вони є лише апроксимацією відповідних характеристик, що можуть бути більш чи менш точними.

Необхідність збору та обробки експериментальних даних зумовлена об'єктивними обставинами, так як дійсні значення показників якості складних об'єктів зазвичай істотно відрізняються від розрахованих на стадіях проектування.

Ці відмінності є наслідком низки причин:

1) На стадії проектування, коли недостатньо точних і повних даних про характеристики процесів, що відбуваються в об'єкті та під впливом зовнішнього середовища, доводиться робити значні припущення та накладати обмеження. На практиці деякі з цих припущень можуть виявитися недостатньо обґрунтованими чи навіть хибними;

2) З моментом введення об'єкта в експлуатацію зовнішнє середовище поступово змінюється, наприклад, змінюються стиль і методи роботи користувачів, з'являються нові потреби в рішенні завдань. Такі зміни неможливо передбачити заздалегідь;

3) Умови експлуатації, кваліфікація обслуговуючого персоналу в різних організаціях мають свою специфіку;

4) Під час експлуатації змінюються характеристики технічних, програмних та інформаційних засобів, а також їх взаємне відображення. Ці зміни призводять до коригування характеристик потоків запитів на вирішення завдань і параметрів їх обслуговування.

Отже, фактичні значення показників якості не лише відрізняються від розрахункових, але й змінюються з часом. Вони мають свої особливості для однакових типів об'єктів, що експлуатуються в різних організаціях, та підлягають коливанням, які залежать від часу та характеру виконуваних робіт на об'єкті.

Залежно від стадії життєвого циклу АСОІУ, завдання обробки експериментальних даних мають свої особливості. На стадії створення є можливість проведення як активних, так і пасивних експериментів. Термін «активний експеримент» означає можливість вибору обсягу експериментів, послідовності та значень характеристик впливу на об'єкт за бажанням дослідника. Проведення активних експериментів дозволяє визначити діапазон умов, за яких проводиться оцінка якості. Спеціально підібрані умови дослідження та раціонально розроблені плани експериментів забезпечують статистичну незалежність результатів випробувань.

Реальні умови експлуатації об'єкта в конкретній організації можуть значно відрізнятись від тих, які передбачалися під час проведення випробувань. Тому показники, отримані в ході випробувань, містять певну частку абстракції. На стадії створення час для проведення випробувань обмежений, що ускладнює збирання великого обсягу експериментальних даних для повноцінної оцінки шуканих показників. У пасивних експериментах кількість спостережень, послідовність та значення впливів визначаються реальною ситуацією експлуатації об'єкта, що означає, що дослідник має обмежену можливість керування якістю та кількістю експериментальних даних.

На стадії експлуатації можливості проведення активних експериментів значно обмежені або взагалі відсутні, що зазвичай призводить до взаємної залежності результатів спостережень. Наявність такої залежності ускладнює обробку отриманих даних, а ігнорування цього факту може призвести до зміщення оцінок, неможливості точного визначення впливу різних факторів на показники функціонування об'єкта, а також до інших небажаних наслідків. Нестационарні умови експлуатації та періодичні або нерегулярні мінливі впливи (тренди) вимагають розгляду характеристик не як випадкових величин, а як випадкових функцій, що є необхідною умовою для коректної оцінки та прогнозування.

Проте через недостатню розробленість методів і засобів оцінки параметрів випадкових процесів, зазвичай припускається, що процес функціонування об'єкта має стаціонарний або кусково-стаціонарний характер. Задачі формування та обробки експериментальних даних включають в себе низку взаємопов'язаних завдань. Експериментальна оцінка якості передбачає вирішення цих завдань для отримання точних і надійних результатів, що дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо параметрів функціонування об'єкта чи системи.

До основних задач експериментальної оцінки якості можна віднести:

1. Складання переліку реєстрованих параметрів, необхідних для обчислення оцінок показників АСОІУ.
2. Вибір моментів і способів реєстрації первинних параметрів.
3. Вибір або розробка методів перетворення експериментальних даних для оцінювання необхідних показників.
4. Розробка алгоритмів вимірювання, створення програмних, інформаційних та інших засобів, що реалізують відповідні процедури реєстрації, зберігання, обробки і видачі даних.

Ці задачі дозволяють створити ефективну систему для збору і обробки даних, що забезпечує достовірність і точність оцінок характеристик систем.

Ця група завдань має прикладний характер і не вимагає подальшого розгляду в даному контексті. Складання переліку реєстрованих параметрів (визначення інформаційних потреб) передбачає кілька етапів:

1. Визначення складу властивостей об'єкта та зовнішнього середовища, що підлягають експериментальному оцінюванню. Слід включати тільки необхідні властивості, оскільки розширення переліку може значно ускладнити задачу та збільшити накладні витрати на ресурсне забезпечення АСОІУ, що може негативно вплинути на виконання основних функцій.

2. Послідовна декомпозиція складних властивостей до рівня простих, які однозначно характеризуються відповідними показниками. Перелік властивостей має бути визначений з деталізацією як для АСОІУ в цілому, так і для досліджуваних її компонентів.

3. Вибір показників, що характеризують кожне властивість або їх групи, здійснюється з урахуванням специфіки реалізації конкретних функцій об'єкта. Наприклад, для оцінки надійності об'єкта використовуються специфічні показники, які можуть враховувати як безперервно, так і дискретно виконувані функції. Це дозволяє більш точно відобразити ефективність функціонування об'єкта та його компонентів в умовах реальної експлуатації, враховуючи характер і умови виконуваних операцій.

4. Формування статистичного визначення кожного оцінюваного показника включає деталізацію параметрів до рівня таких величин, які можуть бути виміряні чи зареєстровані під час спостереження за роботою об'єкта. Наприклад, оцінка ймовірності своєчасної обробки запитів може здійснюватися через деталізацію за типами запитів, де типами P_i ($t_{ij} < t_{доп}$), де i – тип запиту, t_{ij} – час обробки j -го запиту i -го типу, $t_{доп}$ – допустимий час обробки запитів. Величина t_{ij} формується шляхом реєстрації години надходження запиту в систему, видачі відповіді на запиту i обчислення часу обробки. Оцінювана вірогідність P_i ($t_{ij} < t_{доп}$), при великій кількості запитів еквівалентна частоті m_i / n_i , де m_i – кількість своєчасно, а n_i – загальна кількість всіх оброблених запитів заданого типу. Таким чином, для реєстрації та подальшої обробки необхідно фіксувати такі дані: час початку і завершення обслуговування запитів з деталізацією за типами; факти завершення обробки всіх запитів, а також факти своєчасної обробки запитів, знову ж таки, з деталізацією за типами. Сукупність величин ($t_{доп}$) і кількості типів запитів є вихідними даними для аналізу.

Деталізація параметрів повинна відповідати структурі об'єкта, ієрархії функцій, резервним можливостям і іншим аспектам. Необхідно враховувати, що деякі події, зокрема непередбачувані помилки чи відмови, можуть бути невиявлені засобами контролю, тому певні властивості об'єкта неможливо оцінити безпосередньо на основі результатів експлуатації. У таких випадках показники визначаються непрямым шляхом, шляхом обчислення на основі інших доступних параметрів.

5. Об'єднання первинних реєстрованих параметрів, які використовуються для оцінки різних показників, утворює інформаційну потребу. В процесі об'єднання необхідно враховувати неоднорідність компонентів АСОІУ за їх призначенням та режимами роботи. Ігнорування цієї неоднорідності може призвести до зміщення оцінок, що впливає на точність та достовірність результатів.

Вибір моментів та способів реєстрації первинних параметрів здійснюється на основі аналізу складу реєстрованих даних та можливостей апаратних і програмних засобів конкретної АСОІУ. Створення або використання спеціальної апаратури для реєстрації первинних параметрів не є доцільним, оскільки більш ефективним є застосування програмних засобів. Частина таких засобів вже є в складі типових операційних систем, і для їх використання достатньо лише налаштування. Інші ж засоби потребують розробки для специфічних завдань.

Існують два основних способи реєстрації – реєстрація системних подій і періодична реєстрація.

Перший спосіб полягає в реєстрації первинних відомостей (вимірювань) безпосередньо в процесі виконання керуючих програм операційної системи або програм прикладних завдань. Це дозволяє реєструвати моменти приходу заявок на вирішення завдань, появу сигналів переривань від схем контролю та інші подібні події, що відбуваються в ході функціонування системи.

Другий спосіб є більш простим в реалізації та модифікації, оскільки вимірювальні засоби залишаються відносно автономними як в конструктивному, так і в операційному плані. Вони не потребують інтеграції з основними функціями системи, що дозволяє легше їх оновлювати або змінювати. Частота реєстрації в цьому випадку визначається з урахуванням оптимізації витрат ресурсів системи, зберігаючи при цьому задану точність вимірювання параметрів.

Вибір або розробка методів перетворення експериментальних даних (ЕД) для оцінки необхідних показників включає в себе формалізацію процедур первинної, попередньої та основної обробки результатів реєстрації.

Первинна обробка даних має на меті перетворити зареєстровані величини в зручний для подальшого зберігання формат. На цьому етапі не застосовуються складні математичні методи. Дані можуть бути піддані «стисненню», наприклад, шляхом класифікації результатів і занесення їх до

відповідних розрядів статистичного ряду. Потім вони зберігаються в спеціальних масивах в основній або зовнішній пам'яті обчислювальної системи.

Основна особливість алгоритмів для реєстрації та первинної обробки полягає в необхідності їх реалізації у реальному часі, з жорсткими вимогами до часу початку і виконання операцій. Водночас, ці алгоритми не повинні помітно впливати на виконання основних програм АСОІУ, забезпечуючи мінімальне навантаження на систему та забезпечуючи точність і надійність обробки даних.

Попередня обробка даних спрямована на їх узагальнення та сортування, що дозволяє організувати дані відповідно до системних подій і періодів спостереження. Вона дозволяє підготувати дані до більш детального аналізу, виділяючи основні патерни і структуру в потоці даних.

Основна обробка даних має на меті оцінку конкретних показників і функцій, що визначаються цілями експериментального дослідження. Для цього використовується більш складний математичний апарат, що потребує великих обсягів обчислень, включаючи моделювання, статистичні методи та аналіз зв'язків між різними параметрами.

Попередня і основна обробка часто виконуються в фоновому режимі, що дозволяє зменшити навантаження на основні функції АСОІУ. Оскільки ці етапи не вимагають виконання в реальному часі, вони можуть бути реалізовані на окремих обчислювальних засобах або у вигляді відкладених завдань. Проте варто пам'ятати, що навіть при такому підході є ймовірність виникнення помилок на всіх етапах обробки, включаючи реєстрацію, попередню і основну обробку. Ці помилки можуть виникати через неточність вимірювань, помилки в алгоритмах обробки даних або технічні проблеми з апаратними засобами. Тому важливо забезпечити надійний механізм контролю та валідації даних..

Помилки в обробці експериментальних даних можуть бути різних типів, і їх можна класифікувати за джерелами та характером:

1. Інструментальні помилки:

- Це помилки, пов'язані з похибками процедур реєстрації, такими як затримки при включенні в роботу вимірювальних засобів, несправності в обладнанні або програмному забезпеченні, а також інші технічні проблеми. Вони зазвичай мають випадковий характер, оскільки виникають через непередбачувані або мінімально контрольовані фактори (наприклад, затримка в обробці сигналу або випадкові збої в апараті).

2. Методичні помилки:

- Визначаються вибором методів обробки даних та допущеннями, зробленими на етапі проектування або в процесі збору даних. Це можуть бути помилки, які виникають через:

- Подання безперервних величин у вигляді дискретних значень, що може призвести до втрати точності при вимірюванні.

- Узагальнення вимірювань у вигляді класифікаційних статистичних рядів, що також може спростити дані, але викликати втрату деяких важливих відмінностей або тенденцій.

- Методичні помилки можуть бути як випадковими, так і систематичними:

- Випадкові методичні помилки можуть бути результатом невинних варіацій в умовах проведення експериментів або в обробці даних, що не можна точно передбачити.

- Систематичні методичні помилки виникають через неправильні припущення, що повторюються у всіх вимірюваннях і призводять до систематичних відхилень в оцінках.

Для мінімізації цих помилок важливо використовувати перевірені методи реєстрації та обробки даних, а також проводити регулярну перевірку інструментів і алгоритмів, щоб забезпечити точність та надійність результатів експериментальних досліджень.

Надалі будемо вважати, що по кожній оцінюваній характеристик-тику формується сукупність спостережень $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, що складається з

безлічі результатів реєстрації. Відзначимо ряд основних властивостей даної сукупності: конкретні значення є результатом прояви однієї і тієї ж закономірності; сукупність складається з варіюються величин, що відрізняються своїми значеннями. Властивість варіації викликає необхідність обробки всього безлічі спостережень; результати реєстрації носять випадковий характер і містять у собі які не можна усунути помилки.

Дійсно, результати обробки експериментальних даних (ЕД) носять приватний характер, що означає, що вони є специфічними для конкретних умов експерименту, об'єкта або ситуації. Це важливий аспект, оскільки без належного обґрунтування та аналізу, що враховує контекст проведення експерименту, не можна робити узагальнюючі висновки щодо аналогічних об'єктів або систем в інших умовах.

Основні моменти, які слід врахувати:

1. *Контекст експерименту:* Умови, за яких проводиться експеримент (наприклад, технічні характеристики об'єкта, параметри зовнішнього середовища, режим роботи), можуть значно впливати на результати. Різні умови можуть призводити до різних результатів, навіть для однакових типів об'єктів або систем.

2. *Необхідність обґрунтування узагальнень:* Для того, щоб узагальнення результатів були обґрунтованими, необхідно враховувати можливі варіації умов експлуатації, відмінності в конструкціях, налаштуваннях або параметрах об'єктів. Це важливо для того, щоб гарантувати точність і достовірність висновків при застосуванні результатів до нових ситуацій.

3. *Важливість статистичного підходу:* Для оцінки можливості узагальнення результатів необхідно враховувати статистичні методи, такі як використання репрезентативних вибірок даних, оцінку похибок і невизначеності результатів. Це дозволяє оцінити, наскільки отримані дані можуть бути застосовані до інших об'єктів або ситуацій.

4. *Ризик перевищення допустимих припущень*: Якщо не враховуються ці обмеження, можна зробити неправильні висновки, що можуть призвести до помилок у подальших рішеннях, зокрема в оцінці ефективності або надійності подібних систем чи об'єктів в інших умовах експлуатації.

З цієї причини, важливою частиною обробки даних є також проведення додаткових аналізів, перевірка коректності припущень і застосування методів, які дозволяють точно передбачати можливі зміни результатів при зміні умов експлуатації або технічних характеристик об'єкта.

2.3 Ортогональні плани другого порядку

Планування експерименту дозволяє знайти залежність деякої величини від безлічі змінних факторів у вигляді поліноміальної моделі

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1)$$

Де b_0 , b_i , b_{ij} - відповідно коефіцієнти регресії при нульовому ($x_0=1$), лінійному, квадратичному і т. д. змінних параметрах; x_i ; b_{ij} - коефіцієнт регресії, що показує парне вплив змінних x_i і x_j на $\tilde{y}$.

Планування експерименту полягає в організації спостережень (вибірок) за заздалегідь розробленою схемою, яка має певні оптимальні властивості. Розробка таких схем є складною математичною задачею, що дозволяє визначити стратегію експерименту таким чином, щоб для виявлення залежностей використовувалася мінімальна кількість інформації. Ключові аспекти цього процесу:

- 1) орієнтація на мінімізацію загальної кількості експериментів;
- 2) одночасне варіювання всіх змінних, що впливають на процес, відповідно до спеціальних правил та алгоритмів;
- 3) застосування математичних методів, які формалізують дії експериментатора;

4) вибір чіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожної серії експериментів.

Мінімізація кількості спостережень здійснюється за рахунок оптимального використання всього n – мірного факторного простору перемінних x_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

Для побудови математичної моделі області оптимуму у вигляді рівняння (1) використовуються спеціалізовані плани. Г. Е. П. Бокс і К.Б. Вілсон запропонували використовувати ортогональні плани першого порядку як основу, на базі якої потім розширюється конструкція плану другого порядку. Такі плани називаються композиційними і повністю відповідають концепції крокової процедури. Дійсно, досягнувши області екстремуму, ми можемо застосувати план повного факторного експерименту (ПФЕ), доповнивши його до плану другого порядку.

Побудова центрального композиційного плану при наявності ядра зводиться до нарощування точок, розташованих у центрі плану (на нульовому рівні факторів) і на відстані d від центру. У побудові композиційних планів плече d можна вибрати таким чином, щоб план залишався ортогональним.

Для того, щоб зберегти ортогональність плану необхідно побудування матриці планування другого порядку забезпечити дві умови:

$$\sum_{u=1}^n x_{ou} x_{iu}^2 = 0 \quad \text{і} \quad \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 x_{ju}^2 = 0. \quad (2)$$

Якщо виконуються умови, то матриця центрального композиційного плану ортогональна. Перше з умов може бути задоволено шляхом перетворення квадратичних змінних:

$$x'_i = x_i^2 - \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}{n} = x_i^2 - \bar{x}_i^2. \quad (3)$$

Параметр оптимізації повинен відповідати таким вимогам:

- мати здатність до вимірювання при різних варіантах змін або комбінацій

режимів технологічного процесу.

- бути статистично ефективним, тобто змінюватися з максимальною точністю.
- містити інформацію, що дозволяє всебічно охарактеризувати механічну обробку.
- мати фізичний зміст, тобто надавати корисні результати в рамках відповідних умов обробки.
- бути однозначним, тобто зосереджуватися на мінімізації одного конкретного аспекту або деталі.

Математичний апарат теорії планування експериментів базується на методах математичної статистики та методах розв'язування експериментальних задач. При оцінюванні статистичних характеристик не виникає потреби визначати порядок вибірки.

Якщо виконати взяття вибірок по певному плану, то ми маємо можливість оцінити кількісно багатofакторну статистичну залежність при обмеженому об'ємі вибірок.

Планування експерименту дозволяє знайти залежність деякої величини від більшості перемінних факторів x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ в виді поліноміальної моделі

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1)$$

де b_0 , b_i , b_{ij} - відповідно коефіцієнти регресії при нульовому ($x_0 = 1$), лінійному, квадратичному і т. д. змінних параметрах; x_i ; b_{ij} - коефіцієнт регресії, що показує парне вплив змінних x_i і x_j на $\tilde{y}$.

Планування експерименту – це постановка спостережень (взяття вибірок) за деякою заздалегідь складеної схемі, що володіє якими – то оптимальними властивостями.

Розробка таких схем ставить складне математичне завдання, яке дозволяє побудувати стратегію експерименту, що для виявлення залежностей потребує мінімуму інформації. У цьому процесі важливими є такі аспекти:

- орієнтація на мінімізацію загальної кількості експериментів;
- одночасне змінювання всіх змінних, що визначають процес, відповідно до спеціальних правил і алгоритмів;
- застосування математичних методів, що формалізують багато дій експериментатора;
- вибір чіткої стратегії, яка дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожної серії експериментів.

Мінімізація кількості спостережень здійснюється за рахунок оптимального використання всього n – мірного факторного простору перемінних x_i , $i=1,2,...,n$.

Для отримання математичної моделі області оптимуму у вигляді рівняння (1) використовуються спеціальні плани.

Г. Е. П. Бокс і К.Б. Вілсон запропонували використовувати ортогональні плани першого порядку як ядро, на якому потім добудовується конструкція плану другого порядку.

Такі плани отримали назву композиційних і повністю відповідають ідеї крокової процедури.

Дійсно, потрапивши в область екстремуму, ми можемо реалізувати план повного факторного експерименту (ПФЕ), добудувавши його до плану другого порядку.

Побудова центрального композиційного плану при наявності ядра зводиться до нарощування точок, розташованих у центрі плану (на нульовому рівні факторів) і на відстані d від центру. У побудові композиційних планів плече d можна вибрати таким чином, щоб план залишався ортогональним.

Для того, щоб зберегти ортогональність плану необхідно побудування матриці планування другого порядку забезпечити дві умови:

$$\sum_{u=1}^n x_{ou} x_{iu}^2 = 0 \quad \text{и} \quad \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 x_{ju}^2 = 0. \quad (2)$$

Якщо виконуються умови, то матриця центрального композиційного плану ортогональна.

Перше з умов може бути задоволено шляхом перетворення квадратичних змінних:

$$x'_i = x_i^2 - \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}{n} = x_i^2 - \bar{x}_i^2. \quad (3)$$

Величина залежить від числа фактора k і плеча d :

$$\bar{x}_i^2 = \frac{2^k + 2d^2}{2^k + 2k + 1}. \quad (4)$$

Позначимо $\bar{x}_i^2 = \phi$, тоді $\phi = \frac{2^k + 2d^2}{n}$. Знаменник рівняння дорівнює n , тому що 2^k – число точок ядра, $2k$ – число "зіркових" точок, 1 – одна нульова точка.

В планах Бокса до ядра, побудованому на основі ПФЕ, добудовується одна точка в центрі плану з координатами $(0, 0, \dots, 0)$ і $2k$ "зіркових" точок з координатами $(\pm g, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm g)$.

Загальна кількість точок плану при використанні композиційному плануванню складе: $N = N_0 + 2k + 1$,

де N_0 – кількість точок ядра плану.

Аналогічно будуються ЦКП для довільного числа чинників, при цьому кожен фактор варіюється на п'яти рівнях: $-g; -1; 0; 1; g$.

У матриці плану другого порядку не у всіх стовпців дотримується умова симетрії і не всі пари стовпців ортогональні.

Для усунення асиметрії і порушень ортогональності ЦКП Боксу необхідно провести перетворення квадратичних параметрів і спеціальним чином вибрати величину плеча g .

Вихідна і перетворена модель еквівалентна, у них всі навантаження, за винятком нульового співпадають.

Після перетворення отримаємо матрицю планування.

Таблиця 2.1

Матриця планування чотирьох факторного експерименту

g	X1	X2	X3	X4
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	-	+
7	-	-	+	+
8	+	+	+	+

Неважко помітити, що в цій таблиці суми елементів у всіх стовпцях, окрім стовпця x_0 , дорівнюють нулю. Тобто, в перетвореній таблиці зберігається властивість симетрії. Однак стовпці, що містять квадратичні члени, не є ортогональними для довільних значень g .

За умов ортогональності векторів стовпців квадратичних членів, запишемо ще одне рівняння:

$$2^k(1-\varphi)^2-4\varphi(d^2-\varphi)+2(k-\varphi)\varphi^2+\varphi^2=0. \quad (5)$$

Вирішуючи спільно рівняння, отримаємо загальні формули для визначення величин φ і d при побудові ортогональних другого порядку:

$$\varphi = \sqrt{\frac{2^k}{n}}; \quad (6)$$

$$d = \sqrt{\frac{n\varphi - 2^k}{2}}, \quad \text{якщо ядро плану становить повний факторний}$$

експеримент типу 2^k . При $k \geq 5$ як ядро може використовуватися полу репліка від повного факторного експерименту, тобто 2^{k-1} опитів. У цьому випадку вигляд формул (4) та (5) не змінюється, тільки замість k слід підставити величину $k - 1$.

При побудові ортогональних планів на число нульових точок накладається будь – якого обмеження, тому можна прийняти мінімум цих точок ($n_0 = 1$).

Забезпечивши ортогональність плану, тим самим отримуємо можливість визначити коефіцієнт регресії за досить простою формулою і незалежно один від одного:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}, \quad (7)$$

де i – номер стовпця в матриці планування; x_{iu} – елементи i -го стовпця. Знаменник у формулі не залежить від результатів дослідів, тому його можна обчислити заздалегідь, що спрощує обробку результатів експерименту.

Дисперсії коефіцієнтів регресії оцінюються за формулою:

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_y^2}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}, \quad (8)$$

Залишкова сума квадратів:

$$S_R = \sum_{u=1}^n y_u^2 - \sum_{i=0}^{k_1} b_i \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u, \quad (9)$$

з числом ступенів свободи:

$$f_R = n - k_1, \quad k_1 = 0,5(k + 2)(k + 1). \quad (10)$$

Оскільки було проведено перетворення квадратичної змінної, то рівняння регресії дещо відрізняється від звичної звичайної форми запису:

$$y = b_0' + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} (x_i^2 - \varphi). \quad (11)$$

Щоб перейти до звичайної форми запису, знаходять величину:

$$b_0 = b_0' - \sum_{1 \leq i \leq k} \varphi b_{ii}, \quad (12)$$

яка оцінюється дисперсією:

$$s_{b_0}^2 = s_{b_0'}^2 + \sum_{1 \leq i \leq k} \varphi^2 s_{b_{ii}}^2. \quad (13)$$

Застосовуючи ортогоналізацію, введено перетворення

$$x_i' = x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2, \quad (14)$$

де для нашого випадку число експериментів $N = 25$.

Коефіцієнти рівняння регресії (1) для центрального композиційного ортогонального плану визначаються за формулами

$$b_0' = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_u, \quad (15)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (16)$$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Математичний апарат теорії планування експерименту базується на методах математичної статистики та розрахунку експериментальних задач. Коли вибірки беруться за певним планом, це дає можливість кількісно оцінити багатofакторну статистичну залежність при обмеженому обсязі даних.

Фактичні значення показників якості не тільки відрізняються від розрахункових, а й змінюються з часом. Вони мають свої специфічні особливості для одного і того ж типу об'єктів, що експлуатуються в різних

організаціях, і піддаються коливанням, які залежать від часу та характеру виконуваних робіт.

Отже, кожне зареєстроване значення є конкретним проявом певної закономірності. В узагальненому вигляді мета обробки експериментальних даних полягає в тому, щоб виявити цю закономірність за допомогою відомостей про окремі події та представити шукану закономірність у кількісній формі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

3.1 Призначення та опис об'єкта механічної обробки

Деталь: ступінчастий вал.

Матеріал: сталь марки 46 згідно з ГОСТ 4543-78.

Метод виготовлення: ковка.

Після завершення остаточної обробки вал направляється на етап збирання.

Вали – відповідальні деталі, основне їх призначення полягає в передачі моменту, що крутить, між різними механізмами машин і пристроїв.

У сучасному машинобудуванні механічна обробка методом зняття стружки становить до 30-40% загальної трудомісткості виготовлення машин, навіть у найбільш розвинених галузях. Це робить технологічність деталей, призначених для механічної обробки, особливо важливою, що набуває ще більшого значення в умовах механізації технологічних процесів.

Вали є важливими деталями, основне призначення яких полягає у розміщенні на них обертових елементів, таких як зубчасті колеса, шків, барабани, диски, кулачки, важелі тощо. Їх ключова функція полягає у передачі крутного моменту між різними механізмами машин і пристроїв.

Основними показниками якості валів є точність геометричних форм у поперечному та поздовжньому перерізах. Для забезпечення високої якості виготовлення валів необхідно дотримуватися таких основних вимог під час проектування:

1. Міцність і жорсткість – конструкція повинна витримувати діючі навантаження без виникнення пластичних деформацій і надмірних прогинів.

2. Висока точність обробки – необхідно забезпечити відповідність геометричних параметрів заданим технічним умовам для точного розташування встановлюваних елементів.

3. Надійність у роботі – вибір матеріалу, обробки та конструктивних рішень повинен гарантувати довготривалу експлуатацію без відмов.

4. Технологічність – конструкція валу має бути зручною для виготовлення, з мінімальними затратами на механічну обробку та складання.

5. Балансування – забезпечення рівномірного розподілу маси для зменшення вібрацій і підвищення надійності роботи.

6. Захист від корозії – застосування матеріалів і покриттів, що знижують вплив агресивного середовища.

Дотримання цих вимог дозволяє виготовляти вали з необхідними експлуатаційними характеристиками та високою надійністю.

1. Точні вали доцільно обробляти в центрах, оскільки це забезпечує високу точність їх виготовлення. При цьому важливо передбачити збереження центрів у готовій деталі, що стане у пригоді для можливого переточування або перешліфовування валу під час ремонту. Наявність центрів значно спрощує процес контролю точності геометричних параметрів валу, забезпечуючи надійність та повторюваність вимірювань;

2. Гладкі вали невеликого діаметра і короткої довжини доцільно виготовляти з каліброваного прокату, що забезпечує чистову якість поверхні без необхідності додаткової обробки. Проте для ступінчастих валів, особливо значної довжини, використання такого прокату може бути менш ефективним. Це зумовлено труднощами забезпечення прямолінійності геометричної осі без додаткових технологічних операцій, таких як рихтування або зміцнювальна обробка. Таким чином, вибір матеріалу і методу виготовлення повинен враховувати конструктивні особливості валу та вимоги до його якості;

3. Ступінчасті вали повинні проектуватися з мінімальними перепадами діаметрів, причому бажано, щоб ці перепади були однаковими на всіх рівнях. Крім того, довжини ступенів мають бути однаковими або пропорційними між собою. Такий підхід забезпечує кращу технологічність обробки, спрощує процес виготовлення та покращує балансування вала під час експлуатації;

4. У дрібносерійному виробництві для підвищення ефективності використання гідросупортів під час токарної обробки доцільно впроваджувати групову обробку. Цей підхід передбачає обробку валів декількох найменувань, які мають схожі розміри в межах однієї групи, на одному верстаті. Завдяки цьому мінімізується час і ресурси, необхідні для переналаштування обладнання, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню витрат.



Рис. 3.1. Підготовка заготовок на універсальних верстатах



Рис. 3.2. Процес механічної обробки на токарно – фрезерному верстаті VD16M

3.2 Вибір методів і засобів технічного контролю якості

Для забезпечення ефективного контролю важливо правильно вибрати методи та засоби вимірювання. Вимірювальні інструменти мають відповідати точності, необхідній для оброблюваних деталей. При цьому гранична похибка вимірювальних засобів повинна складати не більше 10–20% від допуску контрольованого параметра. Вибір засобів вимірювання також слід здійснювати з урахуванням економічної доцільності, часу, необхідного на налаштування інструменту, та тривалості самого процесу вимірювання.

Вимірюванню та контролю приділяється значна увага, оскільки вони є основними показниками якості виробництва. Вимірювання – це процес

визначення числового значення вимірюваної величини за допомогою спеціальних технічних засобів, які виражаються в відповідних одиницях вимірювання. Це можуть бути інструменти, такі як штангенциркуль, лінійка, мікрометр та інші.

Для вимірювання розмірів вала після чорнової токарної обробки можуть бути використані різні вимірювальні інструменти, в залежності від точності, яку потрібно досягти. Ось деякі з них:

1. Штангенциркуль – для вимірювання зовнішніх і внутрішніх діаметрів, глибини, а також різних відстаней на валу.
2. Мікрометр – для точного вимірювання зовнішніх діаметрів і товщини вала з високою точністю.
3. Калібри – для перевірки допусків і відповідності вимірювальних розмірів заданим стандартам.
4. Лінійка або лінійний індикатор – для грубих вимірювань, якщо необхідно оцінити розміри без надто високих вимог до точності.
5. Контрольні пристосування (наприклад, калібри або шаблони) – для перевірки форми та розміру вала після обробки.

Вибір конкретного інструменту залежить від типу вала, точності обробки, вимог до допусків і стандартів, а також від доступних технологічних засобів. У роботі для досліджень використовувались:

- Штангенциркуль ШЦ – 1 – 250 – 630 – 0,05 – 1;
- Штангенциркуль ШЦ – 1 – 125 – 0,10 – 1;
- Штангенциркуль ШЦ – 1;
- Мікрометр МК50 – 1;
- Мікрометр МК25 – 1;
- Скоби (циліндричні наружні поверхні).

Граничні калібри використовуються для оцінки розмірів деталей, забезпечуючи одночасний контроль не тільки за самим розміром, але й за відхиленнями форми поверхні, обмеженими конкретними розмірами. Вони

складаються з двох частин: одна частина калібру відповідає більшому відхиленню, а інша — меншому, що дозволяє точно визначити, чи знаходиться деталь у межах допусків.

Завдяки такій конструкції, граничні калібри дозволяють здійснювати контроль за двома важливими параметрами — фактичним розміром деталі та її геометричною формою. Калібрування дозволяє точно встановити, чи відповідає деталь вимогам щодо розміру та форми, що особливо важливо для механічних частин, де точність і форма є критичними для подальшої роботи деталі в складі машини.

3.3 Розрахунок оптимальних показників якості

Для вирішення задачі визначення оптимальних значень параметрів деталі «Вал ступінчатий» та швидкості його обертання, з метою покращення технології виготовлення, важливо враховувати чотири основні фактори, що впливають на точність виготовлення. При цьому необхідно мінімізувати кількість експериментів, що дає змогу зменшити обсяг вибірки.

В теорії планування експериментів існують методи, які дозволяють ефективно оцінювати багатфакторні статистичні залежності при обмеженій кількості спостережень. Оскільки у процесі оцінювання статистичних характеристик не ставиться питання про порядок взяття вибірок, то вибір певного плану експерименту дозволяє значно скоротити число необхідних досліджень.

Це дозволяє не лише зменшити обсяг витрат, а й отримати точні оцінки статистичних залежностей між факторами. У результаті застосування планування експериментів можна ефективно оцінити, як кожен з параметрів впливає на точність виготовлення деталі, і визначити оптимальні значення для досягнення бажаних результатів з мінімальними витратами часу і ресурсів.

Для побудови стандартної ортогональної матриці експерименту з чотирма факторами, застосовуємо метод кодування факторів у безмірні величини. Це дозволяє звести фактори до стандартних числових значень, що спрощує подальше проведення аналізу експерименту.

Ось як можна здійснити кодування та побудувати ортогональну матрицю для чотирьох факторів.

Зв'язок між кодованими та натуральними вираженням фактора задається формулою:

$$x_i = \frac{x_i - x_{i_0}}{\delta_i}$$

де x_i - натуральне значення фактора; x_{i_0} - значення i - го фактору на нульовому рівні; δ_i - інтервал варіювання i - го фактору.

Таблиця 3.1

Композиційний план ортогонального експерименту для чотирьох факторів

Найменування	Фактори					Змінний стан
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		
Нульовий рівень	90	185	1200	115		
Інтервал варіювання	10	65	400	65		
Досліди	X ₀	План				
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
1	+1	-1	-1	-1	-1	22
2	+1	+1	-1	-1	-1	22,8
3	+1	-1	+1	-1	-1	21
4	+1	+1	+1	-1	-1	21,5
5	+1	-1	-1	+1	-1	23,2
6	+1	+1	-1	+1	-1	26,1
7	+1	-1	+1	+1	-1	21,8

8	+1	+1	+1	+1	-1	22,6
9	+1	-1	-1	-1	+1	22,3
10	+1	+1	-1	-1	+1	23,3
11	+1	-1	+1	-1	+1	21,5
12	+1	+1	+1	-1	+1	21,9
13	+1	-1	-1	+1	+1	23,6
14	+1	+1	-1	+1	+1	26,8
15	+1	-1	+1	+1	+1	22,3
16	+1	+1	+1	+1	-1	23,1
17	+1	-1,414	0	0	-1	23,2
18	+1	+1,414	0	0	-1	26,6
19	+1	0	-1,414	0	-1	26,4
20	+1	0	+1,414	0	-1	23,6
21	+1	0	0	-1,414	-1	23,5
22	+1	0	0	+1,414	-1	26,7
23	+1	0	0	0	-1	25,5
24	+1	0	0	0	+1	26,5
25	+1	0	0	0	+1	26,4

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad (4)$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N x'_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N (x'_i)^2} \quad (5)$$

Дисперсія коефіцієнтів регресії розраховуються по формулам [3]:

$$s_{b'_0}^2 = \frac{s_0^2}{N}; \quad (6)$$

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (7)$$

$$s_{b_{ij}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}; \quad (8)$$

$$s_{b_{ii}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N (x_i')^2}, \quad (9)$$

де s_0^2 - помилка досліду, яка визначається за формулою:

$$s_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{k=1}^{N_0} (y_{0k} - \bar{y}_0)^2, \quad (10)$$

де N_0 - число експериментів в центрі плану, а $\bar{y}_0$ - середнє значення цих експериментів.

Оцінка значимості проводиться по критерію Ст'юдента [2].

Дисперсія вільного члена b_0 оцінюється по формулі:

$$s_{b_0}^2 = s_{b_0'}^2 + \frac{16}{25} \sum_{u=1}^N s_{b_{ii}}^2. \quad (11)$$

Дисперсія адекватності s_{ad}^2 визначається по формулі:

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N - l} \sum_{u=1}^N (y_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (12)$$

де l - число членів в уравнении регрессии, які залишилися після оцінки значимості.

Адекватність рівняння (1) визначається за допомогою критерію Фішера [1]

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_0^2}, \quad (13)$$

де умова адекватності $F_p < F_T(\alpha, N-l, N_0-1)$ і F_T - табличне значення критерію Фішера та при рівні значимості α .

Для знаходження екстремальних значень x_i по моделі (1) з членами, які залишилися не виключеними потрібно знайти приватні похідні цієї моделі і прирівняти її до нуля. Розраховувати отриману систему, знаходять стаціонарні точки x_i^* . Підставляти ці значення x_i^* в другі приватні похідні моделі (1) з членами, які залишилися або не виключати і розраховувати визначники

$$a_{11}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}, \quad (14)$$

де елементи служать значення других приватні похідних в стаціонарних точках

$$\tilde{y}''_{x_i x_k}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = a_{ik} \quad (i, k = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

визначувати знаки цих визначників.

По знакам визначників (14) можна сказати є екстремум або не має. Якщо всі визначники позитивні, то в стаціонарних точках досягається мінімум. В тому випадку, якщо присутні знаки, що чергуються, починаючи з мінуса, то в стаціонарних точках x_i^* є максимум функції регресії.

Використовуючи дану теорію, знайдемо оптимальні значення параметрів шпинделя і швидкість його обертання для максимальної точності виготовлення деталі.

Заздалегідь виконані експерименти показали, що така випадкова характеристика як точність приблизно може бути описана нормальним розподілом і область максимуму точності може знаходитися при значеннях подачі (передбачаємо обробку двох шийок $\varnothing 30$, $\varnothing 70$ мм) x_1 від 0,8 до 1,0 мм/об з глибиною різання x_2 від 1,2 до 2,5 мм і при кількості обертань x_3 від 800 до 1600 об./хв., а також при швидкості різання від 50 до 180 м/с. Маючи такі дані,

були розраховані нульовий рівень, інтервал варіювання, а також значення в зіркових точках. Проводячи експерименти в цих точках на точність по плану приведених в таблиці 3.2, були отримані значення точності виготовлення деталі.

Таблиця 3.2

Композиційний план ортогонального експерименту для чотирьох факторів

Найменування	Фактори					Змінний стан
	X_1	X_2	X_3	X_4		
Нульовий рівень	90	185	1200	115		
Інтервал варіювання	10	65	400	65		
Досліди	X_0	План				
		X_1	X_2	X_3	X_4	
1	+1	0,8	1,2	800	50	22
2	+1	1,0	1,2	800	50	22,8
3	+1	0,8	2,5	800	50	21
4	+1	1,0	2,5	800	50	21,5
5	+1	0,8	1,2	1600	50	23,2
6	+1	1,0	1,2	1600	50	26,1
7	+1	0,8	2,5	1600	50	21,8
8	+1	1,0	2,5	1600	50	22,6
9	+1	0,8	1,2	800	180	22,3
10	+1	1,0	1,2	800	180	23,3
11	+1	0,8	2,5	800	180	21,5
12	+1	1,0	2,5	800	180	21,9
13	+1	0,8	1,2	1600	180	23,6
14	+1	1,0	1,2	1600	180	26,8
15	+1	0,8	2,5	1600	180	22,3
16	+1	1,0	2,5	1600	180	23,1

17	+1	0,75	1,85	1200	115	23,2
18	+1	1,05	1,85	1200	115	26,6
19	+1	0,9	0,9	1200	115	26,4
20	+1	0,9	2,8	1200	115	23,6
21	+1	0,9	1,85	450	115	23,5
22	+1	0,9	1,85	1850	115	26,7
23	+1	0,9	1,85	1200	20	25,5
24	+1	0,9	1,85	1200	210	26,5
25	+1	0,9	1,85	1200	+1	26,4

Для даного центрального композиційного ортогонального планування другого порядку по чотирьом факторами в системі Maple була розроблена програма, за допомогою якої можна вирішити задачу по визначенню максимальної точності. Використання даної програми дозволило не лише побудувати багатофакторну регресійну модель другого порядку, але оцінити значимість коефіцієнтів регресії по критерію Стюдента при рівні значимості 0,05 і числа ступенів свободи $N_0 - 1 = 3$, проробив заздалегідь 4 експерименти на нульовому рівні результати яких: 25,4 МПа, 26,0 МПа, 26,7 МПа, 26,5 МПа.

Дані експерименти дозволили знайти помилку дослідження (12) $s_0^2 = 0,336667$, дисперсії коефіцієнтів регресії (6), (7), (8), (9) і розрахункові значення критерію Стюдента t_{ij} .

$$\begin{aligned}
 t_0 &= 204,815; & t_1 &= 5,861; & t_2 &= -7,075; & t_3 &= 6,831; & t_4 &= 2,009; \\
 t_{12} &= -2,327; & t_{13} &= 2,154; & t_{14} &= 0,172; & t_{23} &= -2,327; & t_{24} &= 0,0; \\
 t_{34} &= 0,172; & t_{11} &= -6,071; & t_{22} &= -5,827; & t_{33} &= -5,583; & t_{44} &= -3,390;
 \end{aligned}$$

З приведенного дослідження випливає, що при рівні значимості $\alpha = 0,05$ коефіцієнти, $b_0', b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$, значимі, так як для них $|t_i| > t_T = 3,18$; інші не значимі.

За допомогою програми дана модель була приведена до простої форми запису:

$$\begin{aligned}\tilde{y} = & -0,49206 + 21,06752x_1 + 0,32232x_2 + 0,00638x_3 + 0,43316x_4 - 0,05625x_1x_2 + \\ & 0,00123x_1x_3 + 0,00833x_1x_4 - 0,00002x_2x_3 + 0,000003x_3x_4 - 13,84025x_1^2 - 0,00299x_2^2 - \\ & 0,000002x_3^2 - 0,00696x_4^2.\end{aligned}$$

Дана модель була перевірена на адекватність за допомогою критерію Фішера при рівні значимості $\alpha = 0,05$. Для цього були винайдені значення функції $\tilde{y}$ в усіх 25 точках даного плану. Визначена дисперсія адекватності рівняння регресії $l=14$ и $N=25$. Програмний розрахунок показав, що наша нелінійна модель $\tilde{y}$ адекватна, так $F_p < F_T$ ($0,97 < 8,79$). Звідси слідує, що дану модель можна застосувати для знаходження оптимальних точок, в яких досягається максимум точності. Знаходження оптимальних точок з використанням складеної програми в системі Maple дозволило знайти ці точки, а також знайти значення $\tilde{y}$ в цих точках і показувати з використанням значень визначників (14) в цих точках, які знайдені є точки максимуму. І так, нами були знайдені оптимальні значення подачі $x_1 = 0,94$ мм., з глибиною різання $x_2 = 1,51$ мм., при оптимальній кількості обертань $x_3 = 1410$ об/мин і з швидкістю різання $x_4 = 128,31$ м/с. Дана максимальна точність при цих оптимальних значеннях $y_{\max} = 27,86$ МПа.

Якщо провести виключення незначних коефіцієнтів рівняння (1), то отримаємо рівняння регресії:

$$\begin{aligned}\tilde{y} = & 2,22366 + 20,52707x_1 + 0,25300x_2 + 0,00628x_3 + 0,41735x_4 - 13,84025x_1^2 - \\ & 0,00299x_2^2 - 0,000002x_3^2 - 0,00696x_4^2.\end{aligned}\quad (16)$$

Проведені дослідження показали, що дана модель адекватна по критерію Фішера при рівні значимості $\alpha = 0,05$ і числа членів рівняння регресії $l=9$, так $F_p < F_T$ ($2,98 < 8,79$). Упрощена модель (16) також має максимум в точках $x_1 = 0,93$; $x_2 = 1,60$; $x_3 = 1354$; $x_4 = 115$; і він дорівнює 27,65 МПа. Не важко бачити, що всі оптимальні значення, як для спрощеної моделі, так і для

неспрощеної моделі досить близькі. Спрощення проводилися для простоти розрахунку, що в даний час в зв'язку з розвитком розрахункових засобів можна і не проводити. Вплив деяких факторів нехай і незначне, але воно існує і потім цей вплив оказує деяке значення. Тому для рішення задачі оптимізації факторів взята неспрощена модель регресії.

На рисунках 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 приведені поверхні відгуку точності при обох отриманих максимальних значеннях.

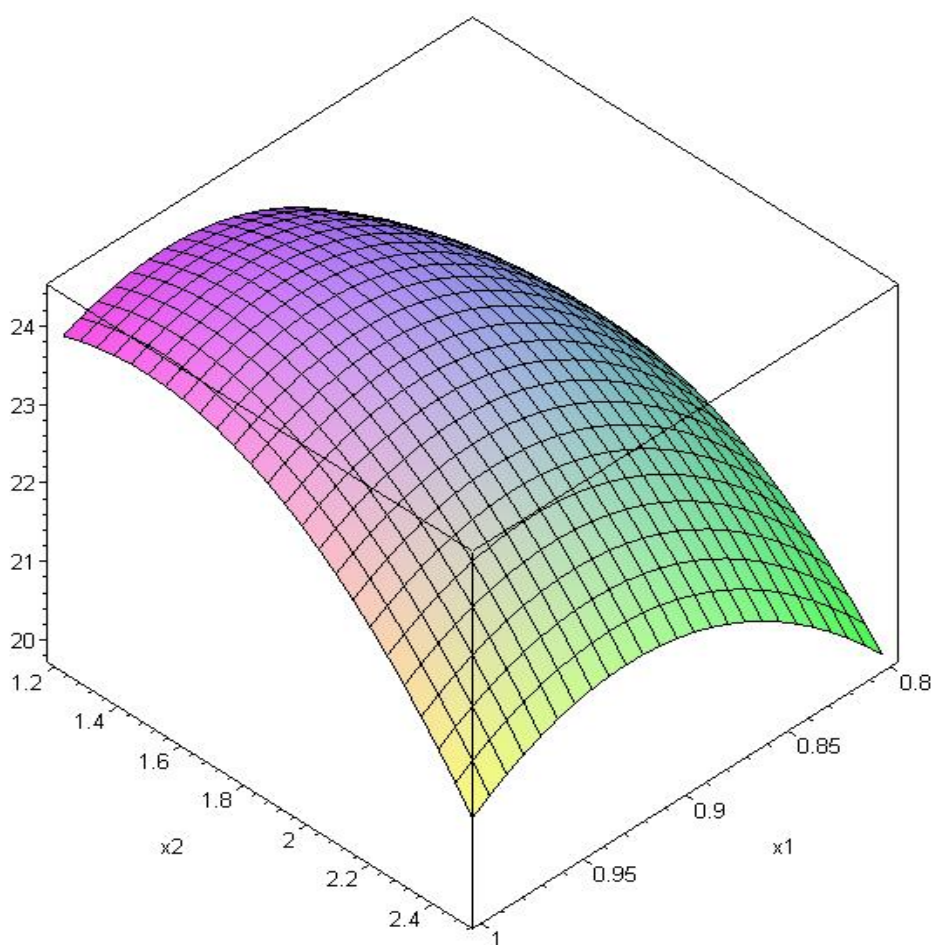


Рис. 3.4. Поверхня точності при оптимальній кількості обертань $x_3 = 1410$ об/хв і з швидкістю різання $x_4 = 128,31$ м/с

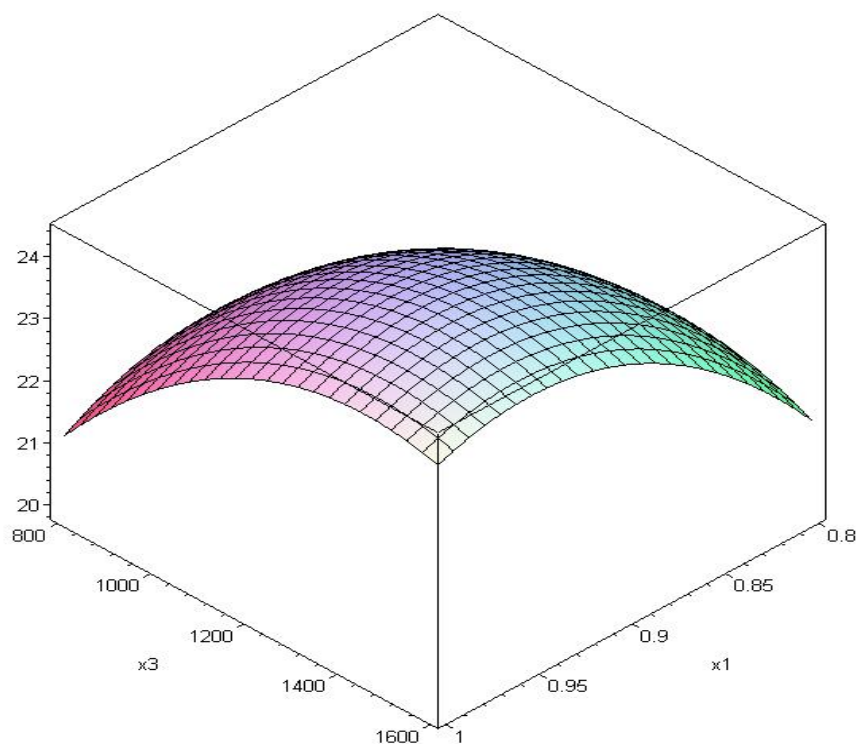


Рис. 3.5. Поверхня точності значення з глибиною різання $\chi_2 = 1,51$ мм., і з швидкістю різання $\chi_4 = 128,31$ м/с.

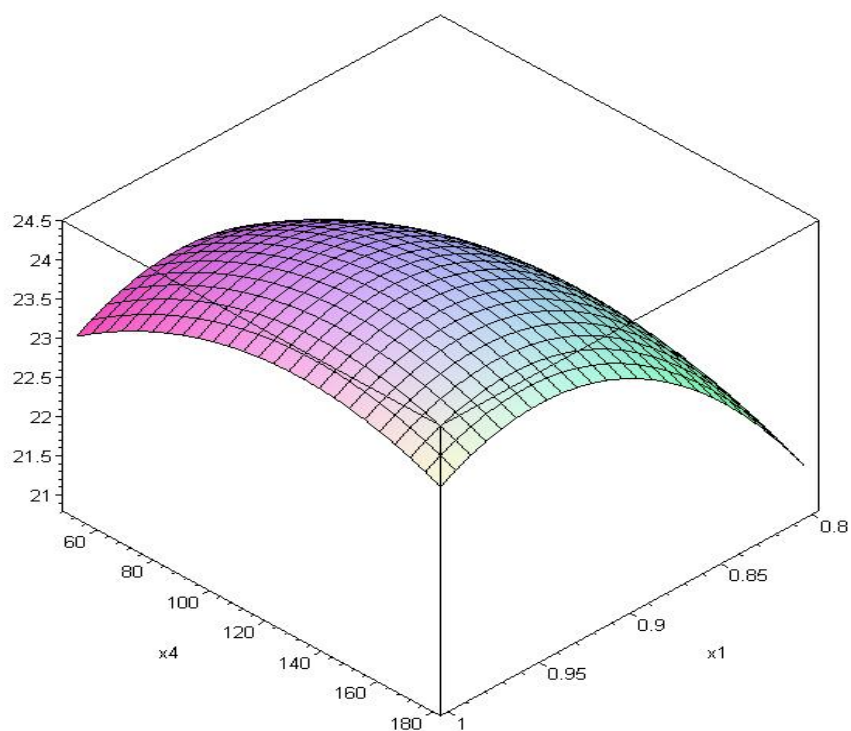


Рис. 3.6. Поверхня точності при оптимальній кількості обертань $\chi_3 = 1410$ об/хв з глибиною різання $\chi_2 = 1,51$ мм.

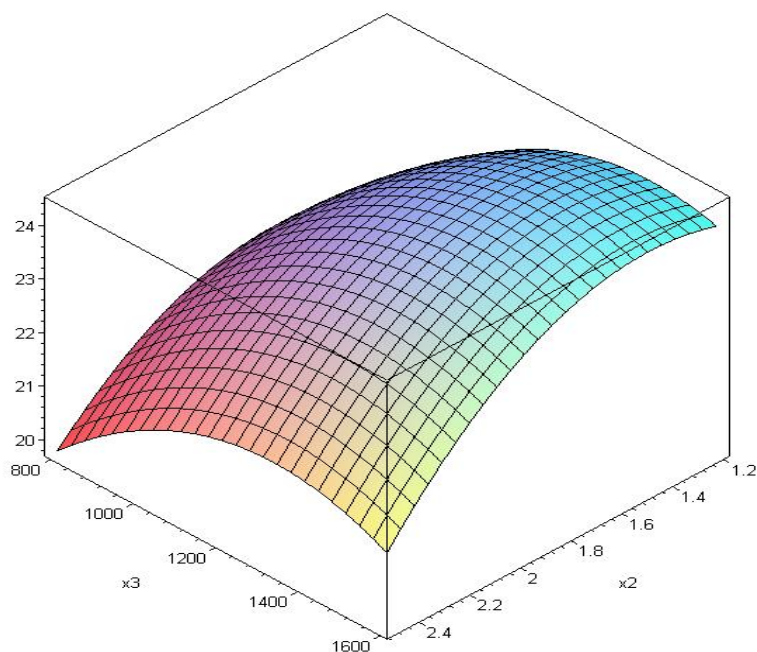


Рис. 3.7. Поверхня точності при знайденому значенні подачі $x_1 = 0,94$ мм., і з швидкістю різання $x_4 = 128,31$ м/с.

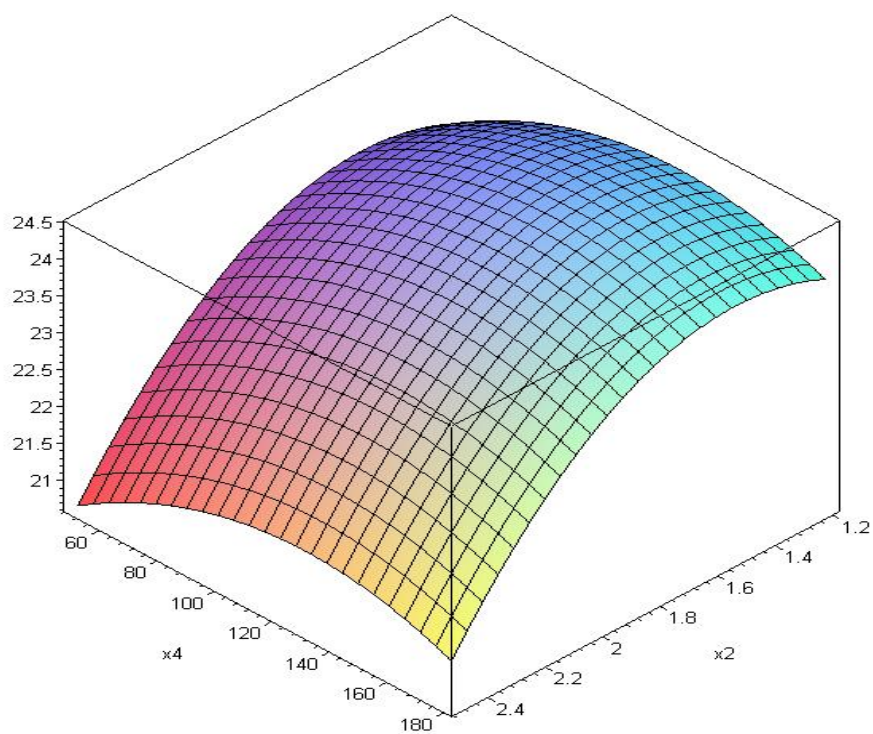


Рис. 3.8. Поверхня точності при знайденому оптимальному значенні подачі значення подачі $x_1 = 0,94$ мм., при оптимальній кількості обертань $x_3 = 1410$ об/хв.

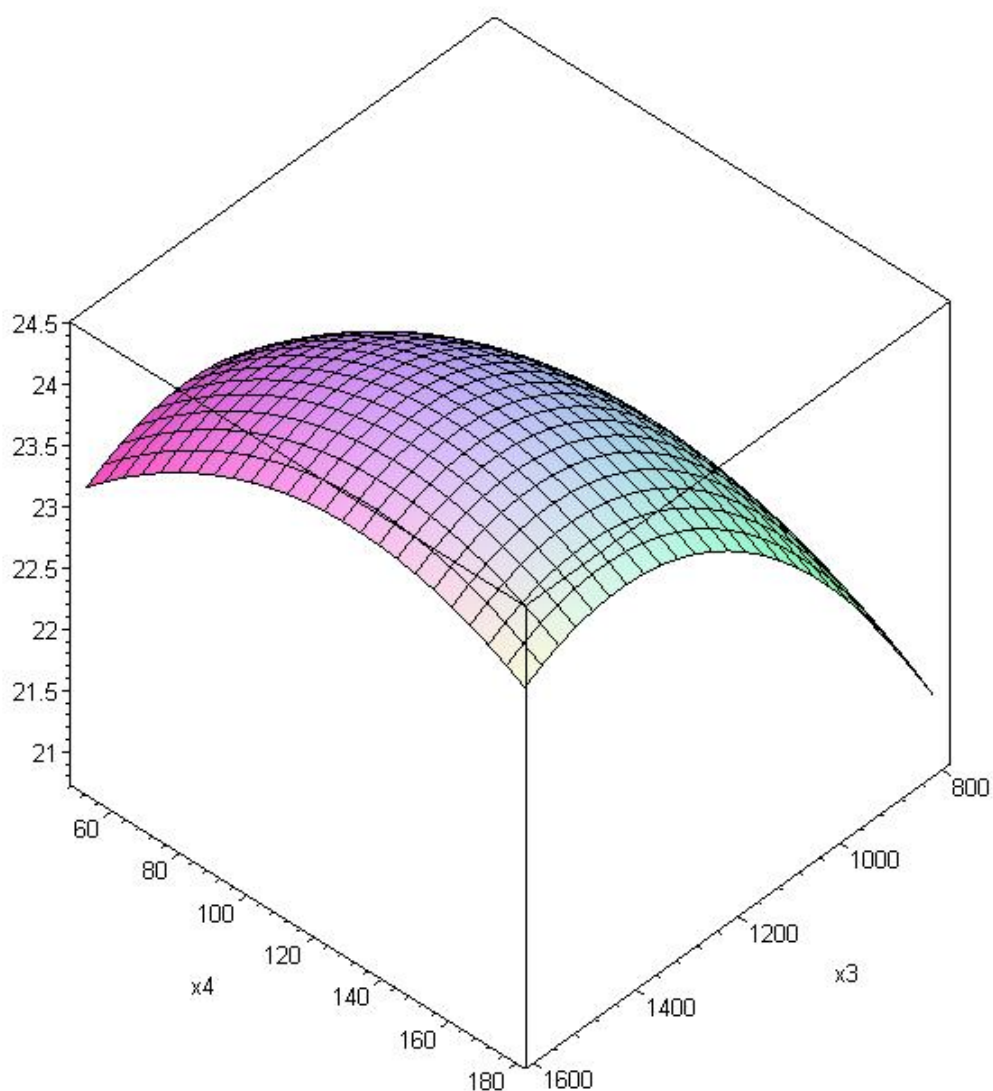


Рис. 3.9. Поверхня точності при знайденому оптимальному значенні подачі $x_1 = 0,94$ мм., з глибиною різання $x_2 = 1,51$ мм.

Из рисунків наглядно видно, что есть точка максимума прочности зависящая от параметров x_1, x_2, x_3, x_4 .

Отримані оптимальні значення факторів дозволили значно збільшити точність виготовлення деталі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Для розв'язання задачі максимізації точності за допомогою центрального композиційного ортогонального планування (ЦКОП) другого порядку по чотирьом факторам, можна застосувати програму в системі Maple, яка допоможе автоматизувати розрахунки. Процес розрахунку включає кілька етапів:

1. Визначення центрального композиційного плану другого порядку: Центральне композиційне ортогональне планування є особливим видом планування експериментів, яке дозволяє оцінити вплив кожного з факторів на результат та визначити взаємодії між ними. У цьому випадку, на основі кодування факторів, планування дає можливість ефективно розподілити експериментальні точки, мінімізуючи кількість експериментів.

2. Формулювання мети задачі: Ваша мета полягає в максимізації точності, що передбачає мінімізацію варіанту оцінки коефіцієнтів моделей, або максимізацію визначеності коефіцієнтів моделі в межах вибраного плану. Це є важливим для отримання найбільш достовірних результатів при обмеженій кількості експериментів.

3. Розробка програми в Maple: Для виконання цих розрахунків у Maple треба написати програму, яка виконує наступні дії:

- Створення матриці центрального композиційного плану для чотирьох факторів.
- Виконання кодування факторів у безрозмірні величини для подальшої обробки.
- Обчислення коефіцієнтів моделі та їх оцінки через матрицю варіації.
- Аналіз результатів та знаходження оптимальних значень параметрів для досягнення максимальної точності.

Використання даної програми у роботі дозволило не лише побудувати багатофакторну регресійну модель другого порядку, але оцінити значимість коефіцієнтів регресії по критерію Стюдента при рівні значимості 0,05 і числа ступенів свободи $N_0 - 1 = 3$.

Дані експерименти дозволили знайти помилку дослідження (12) $s_0^2=0,336667$, дисперсії коефіцієнтів регресії (6), (7), (8), (9) і розрахункові значення критерію Стюдента t_{ij} .

$$\begin{aligned} t_0 &= 204,815; & t_1 &= 5,861; & t_2 &= -7,075; & t_3 &= 6,831; & t_4 &= 2,009; \\ t_{12} &= -2,327; & t_{13} &= 2,154; & t_{14} &= 0,172; & t_{23} &= -2,327; & t_{24} &= 0,0; \\ t_{34} &= 0,172; & t_{11} &= -6,071; & t_{22} &= -5,827; & t_{33} &= -5,583; & t_{44} &= -3,390; \end{aligned}$$

За допомогою програми дана модель була приведена до простої форми запису:

- були знайдені оптимальні значення подачі $x_1=0,94$ мм., з глибиною різання $x_2=1,51$ мм., при оптимальній кількості обертань $x_3=1410$ об/хв і з швидкістю різання $x_4=128,31$ м/с. Дана максимальна точність при цих оптимальних значеннях $y_{\max}=27,86$ МПа.

Визначено, які фактори слабо впливають, а які сильніше. Завдяки даній залежності з використанням лінійної алгебри було знайдено екстремальні точки і значення даної точності і приближеної функції, як виявилось вони майже схожі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішена наукова задача підвищення ефективності експериментальних досліджень, направлених на оптимізацію технологічних процесів. Задача вирішена шляхом розробки нових методів і програмно – апаратних засобів, що дозволяє скоротити часові і вартісні витрати на проведення експерименту. При виконанні роботи використовувалися коректні і достовірні методи дослідження. Достовірність результатів підтверджується також адекватністю отриманих математичних моделей реальних об'єктів і впровадженням їх на ряді промислових підприємств.

Отримані результати можуть знайти широке застосування при експериментальному дослідженні різних об'єктів, що дозволяють здійснення на них активного експерименту.

Було застосовано метод побудови оптимальних ортогональних планів, в основі якого лежать факторні послідовності і типові варіанти оптимальних матриць планування експерименту. Показано, що задача вибору оптимальних ортогональних планів зводиться до задачі вибору відповідних факторних послідовностей. Застосування розробленого методу дозволяє скоротити вартість проведення експерименту в 1,3 - 2,1 рази в залежності від вигляду початкових матриць.

Для автоматизації процесу побудови оптимальних планів багатофакторного експерименту розроблено спеціальне програмне забезпечення - Maple, яка дозволила визначити залежність точності від наступних параметрів: при значеннях подачі x_1 від 0,8 до 1,0 мм/об з глибиною різання x_2 від 1,2 до 2,5 мм і при кількості обертань x_3 від 800 до 1600 об./хв., а також при швидкості різання від 50 до 180 м/с.

Визначено, які фактори слабо впливають, а які сильніше. По даній залежності знайдено з використанням лінійної алгебри екстремальні точки і значення даної точності і приближеної функції, як виявилось вони майже схожі.

