

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до практичних робіт з дисципліни

«Техніка і методика експерименту»

для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство»,  
освітніх програм «Прикладне матеріалознавство», «Термічна  
обробка металів» і «Композиційні та порошкові матеріали,  
покриття» денної та заочної форм навчання

**2022**

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Техніка і методика експерименту» для студентів спеціальності 132. Матеріалознавство», освітніх програм «Прикладне матеріалознавство»; «Термічна обробка металів» і «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» денної та заочної форм навчання /Укл.: В.С. Вініченко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. 48 с.

Укладачі: Вініченко В.С, доцент, к.т.н.

Рецензент: Ольшанецький В.Ю, проф., д.т.н.

Відповідальний за випуск: Ольшанецький В.Ю, проф., д.т.н.

Затверджено  
науково-  
методичною комісією  
\_\_\_\_\_ інженерно-  
фізичного факультету  
Протокол № 6\_  
від “14.”\_02. 2023 р.

Затверджено  
на засіданні кафедри  
"Фізичне  
матеріалознавство"  
Протокол № 4  
від “06”\_12\_2022 р.

## ЗМІСТ

Вступ	4
Практичне заняття 1. Багатофакторний експеримент та можливості застосування його в матеріалознавстві	6
Практичне заняття 2. Методика застосування і аналіз можливостей повного та дробового факторних експериментів	16
Практичне заняття 3. Дослідження властивостей повного і дробового багатофакторних експериментів	24
Практичне заняття 4. Методика проведення експерименту і обробка результатів дослідів	28
Практичне заняття 5. Використання методу крутого сходження по поверхні відгуку для рішення задач з оптимізації	33
Практичне заняття 6. Методика дослідження впливу факторів при використанні моделі у вигляді рівняння ступеневого виду	38
Практичне заняття 7. Дослідження випадків доцільності використання планів другого порядку	41
Додаток А. Правила із техніки безпеки при виконанні практичних робіт	47

## ВСТУП

**Предметом** вивчення навчальної дисципліни «Техніка і методика експерименту» є способи організації і проведення експериментів, методики отримання та обробки даних.

У результаті вивчення навчальної дисципліни «Техніка і методика експерименту» студенти повинні отримати:

### **загальні компетентності:**

- спеціалізовані концептуальні знання новітніх методів та методик моделювання, розробки та дослідження матеріалів. **КЗ.02;**

- здатність до проведення досліджень на відповідному рівні. **КЗ.03;**

- здатність розробляти та керувати проектами. **КЗ.07;**

- здатність працювати автономно та в команді, у тому числі у складі багатопрофільної групи фахівців. **КЗ.09;**

- уміння складати наукові та науково-технічні звіти за результатами роботи. **КЗ.12;**

### **фахові компетентності:**

- спеціалізовані концептуальні знання новітніх методів та методик моделювання, розробки та дослідження матеріалів. **КС.02;**

- здатність застосовувати сучасні методи і методики експерименту у лабораторних та виробничих умовах, уміння роботи із дослідницьким та випробувальним устаткуванням для вирішення завдань в галузі матеріалознавства. **КС.03;**

- знання основ дослідницьких робіт, стандартизації, сертифікації і акредитації матеріалів та виробів. **КС.06;**

Здатність застосовувати системний підхід до вирішення інженерних проблем на основі досліджень в рамках спеціалізації. **КС.11;**

- здатність планувати і виконувати дослідження, обробляти результати експерименту з використанням сучасних інформаційних технологій, програмного забезпечення, інтерпретувати результати натурних або модельних експериментів. **КС.12;**

- уміння формувати дослідницькі науково-методичні та науково-технічні програми науково-дослідницької організації або її підрозділу. **КС.13;**

### **Очікувані програмні результати навчання.**

Уміти організувати розробку програм та проведення комплексних досліджень та випробувань матеріалів, напівфабрикатів

та виробів, отриманих при певних варіантах їх оброблення. **ПРН6.**

Використовувати експериментальні методи дослідження структурних, фізико-механічних і технологічних властивостей матеріалів. **ПРН7.**

Уміти обґрунтовано призначати показники якості матеріалів та виробів. **ПРН14.**

Уміти застосовувати вимоги вітчизняних та міжнародних нормативних документів щодо формулювання та розв'язання наукових та науково-технічних задач розробки, виготовлення, випробування, сертифікації, утилізації матеріалів, створення та застосування ефективних технологій виготовлення виробів.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

### Багатофакторний експеримент та можливості застосування його в матеріалознавстві

**Мета роботи:** - ознайомитися з основними ідеями та поняттями на яких базується метод планування експерименту і з'ясувати можливість застосування його в матеріалознавстві.

#### 1.1 Загальні положення

Багато експериментальних досліджень проводять для перевірки і уточнення результатів теоретичних досліджень у тих випадках коли останні не забезпечують бажану точність рекомендованих значень параметрів, які дозволяють економічно виправдано здійснювати виробничі процеси. При цьому часто виникає необхідність встановлення статистичних зв'язків між декількома величинами для рішення екстремальних задач. Тобто задач щодо вибору оптимальних параметрів технологічних процесів, хімічного складу, тощо. В таких випадках, класичний метод постановки експерименту передбачає фіксування на прийнятих рівнях всіх змінних факторів, крім одного, значення якого певним чином змінюють в області його існування. Цей метод становить основу однофакторного експерименту.

При однофакторному експерименті, варіюючи один фактор і стабілізуючи всі інші на вибраних рівнях, знаходять залежність досліджуваної величини тільки від одного фактору. Проводячи велике число однофакторних експериментів при вивченні багатофакторної системи, одержують залежності, представлені багатьма графіками, що мають ілюстративний характер. При цьому знайдені у такий спосіб залежності досить складно об'єднати в одну загальну.

На сьогодні, для вивчення багатофакторних систем більш доцільним є застосування методу планування експерименту. Під плануванням експерименту розуміють процес визначення числа та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю. Цей метод дозволяє у багатьох випадках при мінімальному числі дослідів одержувати адекватні математичні моделі багатофакторних процесів. При цьому, слід зауважити, що ефективність використання статистичних методів планування експерименту забезпечується в тих випадках, коли

характеристики, які досліджують є випадковими величинами і їх розподіл можна адекватно описати нормальним законом розподілу.

*Характерними рисами* процесу планування експерименту є

- прагнення мінімізувати число дослідів;
- одночасне варіювання всіх досліджуваних факторів за спеціальними правилами;
- застосування математичного апарата;
- вибір стратегії, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожної серії дослідів.

Таким чином під математичною теорією планування експерименту будемо розуміти науку про способи складання економних експериментальних планів, які дозволяють отримувати найбільшу кількість інформації про об'єкт дослідження, про способи проведення експерименту, про способи обробки експериментальних даних і їх використання для оптимізації виробничих процесів, а також інженерних розрахунків.

**Основні поняття й визначення.** Найчастіше експеримент ставлять для рішення однієї із двох основних задач. Першу задачу називають екстремальною. Вона полягає у відшуканні умов проведення процесу, що забезпечують оптимальне (як правило це максимальне або мінімальне) значення обраного параметра. Ознакою екстремальної задачі є пошук екстремуму (максимуму або мінімуму) деякої функції, що описує залежність між технологічними параметрами і бажаною властивістю.

Другу задачу називають інтерполяційної. Вона, досить часто дозволяє скоротити кількість фізично реалізуємих дослідів, зокрема при уточненні значень технологічних параметрів. Для рішення даної задачі будують інтерполяційну формулу за якою можливо передбачувати значення досліджуваного параметра (властивості), що залежить від ряду технологічних параметрів - факторів. Для рішення вказаних задач бажано мати математичну модель досліджуваного об'єкта (*функцію відгуку*). Під математичною моделлю розуміють функції відгуку виду  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Вибір моделі залежить від задачі дослідження та від вимог, що пред'являються до неї. Її, як правило, одержують за результатами дослідів.

Якщо функція відгуку відома, то оптимальні умови процесу можливо знайти без проведення фізичного експерименту. Проте в умовах реального виробництва доводиться вирішувати екстремальні

завдання при відсутності даної функції, зокрема, при неповному знанні механізму процесу, теоретично встановити таку функцію практично неможливо. У цьому випадку вираз функції відгуку невідомо і доцільно застосування методу Бокса-Уілсона (методу чорної скриньки). Даний метод часто є корисним, а іноді єдино доступним для застосування при проведенні досліджень. Зокрема, коли достатньо знати, які зміни можна чинити з вхідними чинниками (їх називають *факторами*) і які результати (значення вихідного параметра) будуть одержуватись на виході. У такій моделі внутрішній устрій може бути невідомий і тому її називають «чорною скринькою».

Стратегія планування експерименту передбачає проведення дослідів поетапно. На першому етапі знаходять область оптимуму. На другому етапі прагнуть одержати більш повне уявлення про поверхню відгуку в області оптимуму. Ця стратегія часто дозволяє вирішити задачу з проведенням меншої кількості фізично реалізуємих дослідів ніж при застосуванні класичного методу дослідження, який передбачає одночасне відшукання і детальне дослідження області оптимуму.

Доцільно реалізовувати досліди невеликими серіями. У кожній серії одночасно варіюють усі фактори за певними правилами. Досліди проводять так, щоб після математичної обробки результатів попередньої серії можна було спланувати наступну серію дослідів або доповнити дану серію. При чому реалізується мінімальна кількість дослідів, яка достатня для рішення даного етапу задачі.

При плануванні екстремального експерименту мета дослідження повинна бути чітко сформульована та мати кількісну оцінку. Характеристику мети (вихідний параметр), задану кількісно, називають *параметром оптимізації*. Параметр оптимізації уявляє собою властивість, що змінюється під впливом факторів, тобто реагує на вплив факторів.

При плануванні експерименту під *математичною моделлю* часто розуміють рівняння, що поєднує параметр оптимізації з факторами, тобто функцію відгуку. Як відомо, експериментально отримані величини містять похибки експерименту. Тому внаслідок того, що значення факторів і вихідного параметру є випадковими величинами, за результатами експерименту можна визначити тільки вибіркові коефіцієнти регресії даного рівняння, які є оцінками теоретичних коефіцієнтів регресії.

З тим, щоб не виконувати «зайві» експерименти, на першому етапі планування експерименту для визначення напрямку руху до оптимуму функцію відгуку намагаються виразити поліномом першого ступеня. Якщо при цьому вдається отримати адекватну модель першого ступеню, то можна зекономити на кількості експериментів, оскільки для отримання такої моделі потрібно виконати меншу кількість експериментів ніж, наприклад, для отримання квадратичної моделі. Якщо не вдається отримати адекватну модель першого ступеню і переходять до побудови більш складної моделі, то вказаної економії кількості дослідів не відбувається. Таким чином скорочення кількості дослідів, при застосуванні методу планування експерименту, можливе тільки в тому разі, якщо можна задовольнити вимоги більш простою моделлю і саме внаслідок того, що для побудови менш складної моделі потрібно виконати меншу кількість дослідів порівняно з кількістю дослідів необхідних для побудови більш складної моделі.

**Об'єкт дослідження.** Для визначення параметра оптимізації і вибору схеми планування експерименту попередньо вивчають об'єкт дослідження на основі апріорної інформації, яку одержують, аналізуючи літературні дані і результати раніше проведених робіт. При плануванні експерименту до об'єкта дослідження пред'являють наступні вимоги.

1. Об'єкт дослідження повинен задовольняти вимогі відтворюваності. При багаторазовому повторенні дослідів його результати мають розкид значень. Кажуть, що об'єкт дослідження задовольняє вимогі відтворюваності, якщо багаторазово повторені дослідів дають результати з розкидом значень, що не перевищує якоїсь заданої величини (довірчого інтервалу).

2. Об'єкт повинен бути керованим. Проте, слід зауважити, що практично немає абсолютно керованих об'єктів. Наприклад, тому, що на реальний об'єкт часто діють некеровані фактори. Вони впливають на відтворюваність результатів експерименту і можуть служити причиною її порушення. Якщо вимога відтворюваності задовольняється, є можливість проведення активного експерименту, який передбачає вибір для кожного дослідів керованих факторів на тих рівнях, які становлять інтерес для дослідження.

*Параметр оптимізації.* Рух до оптимуму можливий, якщо обрано один єдиний параметр оптимізації, а інші виступають як обмеження. Проте, якщо цікавить багато вихідних параметрів, їх можливо

спробувати побудувати один узагальнений параметр який може бути функцією багатьох вихідних параметрів. Параметр оптимізації повинен бути кількісним, доступним для виміру і виражатися одним числом.

Якщо вимірювання параметра неможливо, то користуються ранговою оцінкою. Ранг - це оцінка параметра оптимізації за попередньо обраною шкалою: двобальною, п'ятибальною, десятибальною і ін. Ранговий параметр має обмежену дискретну область визначення. У найпростішому випадку область містить два значення: да – ні; добре – погано; брак - годні деталі і ін. Слід зауважити, що для такого параметра важко оцінити похибку з якою встановлене його значення. Тому при можливості перевагу необхідно віддавати кількісному виміру, оскільки рангова оцінка носить суб'єктивний характер (її значення встановлюється суб'єктом - експертом).

Параметр оптимізації повинен бути:

- однозначним у статистичному сенсі, тобто заданій комбінації рівнів факторів повинно відповідати одне (з точністю до похибки експерименту) значення параметра оптимізації;

- ефективним у статистичному сенсі, тобто визначатися з найбільшою точністю, що дозволяє скоротити до мінімуму число паралельних дослідів;

- існувати для усіх станів досліджуваного об'єкта;

- мати фізичний сенс, інакше важко вважати дослідження науковим.

Параметри оптимізації можуть бути економічними, техніко-економічними, техніко-технологічними та іншими. Економічними є прибуток, собівартість, рентабельність. До техніко-економічних відносять продуктивність, надійність, довговічність. Техніко-технологічними параметрами є механічні, фізичні, фізико-хімічні та деякі інші характеристики виробу. Більшість параметрів оптимізації прямо або опосередковано пов'язані з економічністю виробництва або економічністю експлуатації виробу і таким чином дозволяють об'єднувати декілька вихідних параметрів.

*Фактори.* Фактором називають незалежну змінну величину, що впливає на параметр оптимізації. Кожен фактор має область визначення – сукупність усіх значень, які може приймати фактор.

При дослідженні процесу необхідно враховувати усі значимі фактори. Якщо з якихось причин вплив деяких факторів неможливо

врахувати в експерименті, то ці фактори повинні бути за стабілізовані на певних рівнях протягом усього експерименту. Рівнями називають значення факторів в експерименті. Якщо число факторів велике, то необхідно відсіяти ті фактори, які не впливають на параметр оптимізації. Відсіювання не значимих факторів здійснюють на основі апіорного ранжирування або за допомогою проведення експериментів, що відсіюють. Ці дії дозволяють скоротити витрати на рішення даної задачі.

Фактори повинні бути:

- керованими, тобто такими, що дозволяють експериментаторові встановлювати необхідні значення і підтримувати ці встановлені значення постійними протягом досліджу;

- такими, що безпосередньо впливають на об'єкт дослідження, тому що важко керувати факторами, які є функціями інших факторів;

- сумісними, тобто повинна бути можливість здійснювати експериментально усі комбінації рівнів факторів до того ж безпечно;

- незалежними, тобто дозволяючими експериментаторові встановлювати необхідні рівні будь-якого фактора незалежно від рівнів інших факторів.

Екстремальні задачі часто вирішують, використовуючи *кроковий метод*. В основі крокового методу лежить припущення, що сукупність значень параметра оптимізації  $y$ , отримана при різних комбінаціях значень факторів  $x$ , утворює поверхню відгуку. Для наочності уявлення щодо поверхні відгуку розглянемо випадок коли кількість факторів дорівнює двом.

Для кожного фактора встановимо два значення: максимальне та мінімальне. Між цими значеннями кожний фактор може змінюватися безперервно або дискретно. Границі значень факторів утворюють на площині  $x_1Ox_2$  прямокутник ABCD, усередині якого лежать точки можливих числових значень  $x_1$  і  $x_2$ . (рис. 1)

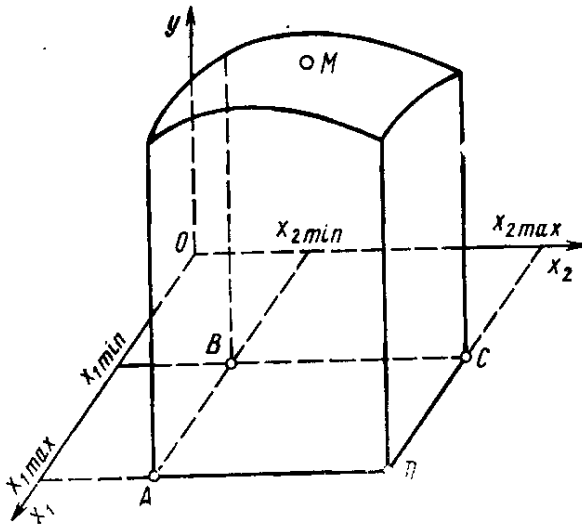


Рисунок 1.1 - Поверхня відгуку

Якщо по осі  $y$  відкладати значення  $y_i$  отримані при різних комбінаціях значень факторів, то точки  $y_i$  будуть лежати на *поверхні відгуку*. На цій поверхні буде перебувати точка  $M$ , що відповідає, в даному прикладі, максимальному значенню вихідного параметра  $y$ . Для знаходження цієї точки необхідно крок за кроком рухатися по поверхні відгуку. Кроковий метод виходить із припущення, що *поверхня відгуку* є гладкою і має єдиний максимум або мінімум, в залежності від поставленої задачі.

Поверхня відгуку розташована в  $k+1$ -мірному просторі, який називають факторним. Розмірність факторного простору залежить від числа факторів ( $k$ ). При великій кількості факторів цей простір є багатовимірним, і геометрична інтерпретація функції відгуку стає неможливою. Для опису в багатомірному просторі поверхні відгуку користуються мовою алгебри. Гладкість поверхні відгуку й наявність на ній однієї точки оптимуму (максимуму або мінімуму в залежності від поставленого завдання) дозволяють рухатися до останньої в будь-якому напрямку, незалежно від вихідної точки.

При кроковому методі кожному факторові надають два значення: максимальне й мінімальне. Ці значення становлять тільки частину

можливих значень факторів. На першому етапі реалізації крокового методу вибирається лише якась підобласть із області можливих значень факторів, і в цій підобласті ставиться експеримент. За результатами цього експерименту будується перша модель, з застосуванням якої передбачаються (розраховуються) значення функції відгуку для значень факторів, що виходять за межі обраної підобласті. Чим далі від цієї підобласті лежить точка, для якої розраховується значення вихідного параметра (його ще називають значенням відгуку), тим з меншою точністю шляхом екстраполяції можна передбачити значення вказаного параметра для цієї точки. Тому екстраполяцію роблять поблизу підобласті експерименту і використовують її для вибору умов проведення наступного фізичного експерименту, тобто встановлюють нові інтервали значень факторів або вибирають нову підобласть факторного простору. Поставивши новий експеримент, будують другу модель і на підставі її роблять наступний крок у напрямку до оптимуму. У цьому й полягає сутність крокового методу.

Виходячи із сутності цього методу до моделі пред'являється головна вимога, що полягає в здатності моделі «передбачати» напрямок подальших дослідів з необхідною точністю. Це означає, що передбаченні (розраховані) за моделлю значення відгуку повинні відрізнятись від фактичних не більше ніж на якусь наперед задану величину. Модель, що задовольняє цій вимозі, називають адекватною. Якщо є декілька моделей, що задовольняють зазначеній вимозі, то з них вибирається найбільш проста.

З математичної точки зору, найбільш простою моделлю є поліном. На першому етапі, часто, застосовують лінійний поліном щодо невідомих коефіцієнтів, що спрощує обробку спостережень. Проте поліном може бути першого, другого і більш високого ступеню. Коефіцієнти полінома обчислюють за результатами дослідів. Чим більше число коефіцієнтів у поліномі, тим більше кількість дослідів необхідно поставити для їхнього визначення. Число коефіцієнтів залежить від ступеня полінома: чим вище ступінь, тим більше число коефіцієнтів. На першому етапі планування визначенні напрямку руху до оптимуму й крутого сходження по поверхні відгуку найбільше доцільно невідому функцію відгуку спробувати апроксимувати поліномом першого ступеня. До речі, *апроксимація* – це заміна однієї функції іншою функцією, що у якомусь сенсі еквівалентна першій. Поліном першого ступеня має мінімальне число коефіцієнтів при

даному числі факторів, а відповідно для його побудови необхідна мінімальна кількість дослідів і він містить необхідну інформацію про напрямок градієнта, під яким розуміють напрямок найшвидшого поліпшення (підвищення чи зниження) параметра оптимізації.

Після досягнення шляхом поступового переміщення по поверхні відгуку підобласті, у якій лежить точка оптимуму, іноді для більш повного опису цієї підобласті переходять від полінома першого ступеня до полінома другого ступеня, який дає можливість, при тих же інтервалах варіювання, з вищою точністю описати область в якій знаходиться точка оптимуму.

### **1.2. Завдання на підготовку до практичного заняття**

Для виконання завдання практичного заняття та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання.

1. Типи задач які вирішують методом планування експерименту (МПЕ).
2. Стратегія проведення досліджень методом МПЕ.
3. Визначення понять параметра оптимізації, факторів та інтервала варіювання.
4. Характеристика математичних моделей, що застосовуються при використанні МПЕ.
5. Переваги та недоліки МПЕ у порівнянні з класичною методикою проведення дослідів.

### **1.3. Контрольні питання**

1. Описати сутність методу Бокса-Уілсона (чорної скриньки).
2. Описати вимоги до об'єкта дослідження.
3. Дати характеристику поняттю фактор в багатофакторному експерименті.
4. Сформулювати вимоги до параметра оптимізації.
5. З яких міркувань вибирають фактори при здійсненні оптимізації технологічних процесів?
6. У який спосіб вибирають значення факторів на нульовому рівні? Навести приклади.
7. Пояснити яка різниця між факторами в кодованому виді і натуральному?
8. З яких міркувань для апроксимації залежності між факторами і вихідним параметром застосовують поліном?

#### **1.4. Матеріали і устаткування**

Технологічний процес термічної обробки.

#### **1.5. Вказівки з техніки безпеки.**

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

#### **1.6. Порядок виконання завдання практичного заняття**

Проаналізувати доцільність застосування методу планування експерименту для оптимізації отриманого процесу термічної обробки. Вибрати фактори, параметр оптимізації і стратегію проведення експериментів. За результатами сформулювати висновки.

#### **1.7 Зміст звіту**

Мета роботи, аналіз отриманих результатів, висновки.

#### **1.8. Література**

Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.— С 4 -14.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

### Методика застосування і аналіз можливостей повного та дробового факторних експериментів

**Мета роботи:** з'ясувати випадки доцільності застосування повного і дробового факторних експериментів.

#### 2.1. Загальні відомості

До оптимізації приступають при наявності деяких результатів попередніх досліджень даного об'єкта. Рішення завдання оптимізації починають із вибору області експерименту. Вибір цієї області здійснюють на основі аналізу апріорної інформації (статей, звітів і ін.) таким чином, щоб вона була якомога ближче до області оптимуму. В вибраній області експерименту встановлюють основні рівні й інтервали варіювання факторів.

Основним або нульовим рівнем фактора називають його значення, прийняте за початкове в плані експерименту. Основні рівні факторів вибирають таким чином, щоб при цих значеннях отримувалося значення параметра оптимізації, по можливості, найбільш близьке до оптимального. Така комбінація рівнів факторів є багатомірною точкою у факторному просторі. Дану комбінацію основних рівнів приймають за вихідну точку для побудови плану експерименту. Побудова плану експерименту полягає у виборі експериментальних точок, симетричних щодо вихідної точки, внаслідок чого, висхідна точка є центром плану.

Інтервалом варіювання фактора називають число (своє для кожного фактора), додавання якого до основного рівня дає верхній рівень фактора, а віднімання – нижній. При цьому важливо пам'ятати, що *інтервал варіювання не може бути встановлений менше тієї похибки, з якою експериментатор фіксує рівень фактора, а також не може бути настільки великим, щоб верхній або нижній рівні виходили за границі області визначення фактора.* При цьому необхідно враховувати, що збільшення інтервалів варіювання розширює область, що досліджується, проте зменшує ймовірність отримання адекватної математичної моделі (функції відгуку) вибраного порядку.

Для зручності запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодують. Кодовані значення фактору визначають за формулою

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{e_i},$$

де -  $\tilde{x}_i$  натуральне значення  $i$  фактору;  $\tilde{x}_i^0$  - натуральне значення основного рівня  $i$  фактора;  $e_i$  - інтервал варіювання  $i$  фактора. Сенс кодування полягає в виборі одиниці вимірювання для кожного фактора таким чином, щоб одиниця вимірювання дорівнювала інтервалу варіювання даного фактора. Тоді значення верхнього рівня фактора становитиме +1, а нижнього -1.

При кодуванні якісних факторів, що мають два рівні, верхній рівень позначається +1, а нижній -1.

Експеримент, у якому реалізуються всі можливі комбінації рівнів факторів, називають *повним факторним експериментом*. Повний факторний експеримент дозволяє кількісно оцінити *лінійні ефекти* і усі *ефекти взаємодії*. *Лінійним ефектом* називають ефект, що характеризує лінійну залежність параметра оптимізації від відповідного чинника. *Ефектом взаємодії* називають ефект, що характеризує сумісний вплив декількох чинників (факторів) на параметр оптимізації.

Оскільки мета першого етапу планування екстремального експерименту одержання лінійної моделі то для цього достатньо варіювання факторів на двох рівнях. Можлива кількість усіх комбінацій рівнів факторів, тобто кількість дослідів, у цьому випадку дорівнює  $2^k$ .

Факторний експеримент здійснюють за допомогою матриці планування, у якій використовують кодовані значення факторів.

Число рядків у матриці дорівнює кількості дослідів. Знаками +1 і -1 позначають рівні факторів  $x_1$  і  $x_2$  у дослідях. *Значення функції відгуку, отримують при виконанні фізичних дослідів в результаті вимірювання значень вихідного параметра* (параметра оптимізації) і позначають через  $y_1, y_2, y_3$  і ін.

Для спрощення запису умов експерименту в матриці планування замість +1 пишуть тільки +, а замість -1 – тільки - .

Дворівневий план ефективний, коли для перевірки адекватності моделі мають певну кількість ступенів свободи, тобто є перевищення числа дослідів над числом коефіцієнтів моделі, що визначаються. Під числом *ступенів свободи* розуміють різницю між числом дослідів і

кількістю коефіцієнтів моделі, що розраховуються за результатами цих дослідів незалежно один від одного. Число ступенів свободи  $f$  при лінійній моделі визначається за формулою

$$f = N - (k + 1),$$

де -  $N$  - число дослідів в матриці;  $k$  - число факторів.

Одиничка означає, що одна ступінь свободи витрачається на розрахунок значення постійної ( $b_0$ ) у шуканій функції.

Наприклад, при двох факторах число дослідів у повному факторному експерименті дорівнює чотирьом, а для визначення коефіцієнтів рівняння регресії досить результатів трьох дослідів. Таким чином, число ступенів свободи в даному випадку, рівне одиниці, може бути використано для перевірки адекватності моделі.

Величина і знак коефіцієнта вказують на вклад даного фактора в загальний результат при переході на верхній або нижній рівень.

Для повного факторного експерименту типу  $2^2$  рівняння регресії з урахуванням ефектів взаємодії можна представити виразом

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (2.1)$$

Для цього експерименту матрицю наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Матриця планування

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y$
1	+	-	-	+	$y_1$
2	+	+	-	-	$y_2$
3	+	-	+	-	$y_3$
4	+	+	+	+	$y_4$

У цій матриці міститься стовпець фіктивної змінної  $x_0$ . Він вводиться для оцінки вільного члена  $b_0$ . Стовпець  $x_1x_2$  отриманий перемноженням стовпців  $x_1$  і  $x_2$ . Він введений для розрахунку коефіцієнта  $b_{12}$ .

Для побудови матриці застосовують, зокрема, прийом, що ґрунтується на правилі чергування знаків. У першому стовпці ( $x_1$ ) знаки

чергуються по черзі, в другому вони чергуються через 2, в третьому - через 4, в четвертому – через 8 і т.д. за ступенями 2-ки.

### **Дробовий факторний експеримент**

При числі факторів більше трьох проведення повного факторного експерименту пов'язано з великим числом дослідів. Проте кількість дослідів можна скоротити, зокрема, якщо об'єкт, що досліджується, можна адекватно описати лінійною моделлю. Слід зазначити, що з застосування лінійної моделі варто починати, якщо є підстави вважати, вплив ефектів взаємодії не суттєвим, тобто їх впливом на вихідний параметр можна нехтувати. У разі правильності такого припущення кількість дослідів можна скоротити внаслідок того, що не потрібно реалізовувати досліди для визначення коефіцієнтів при ефектах взаємодії.

Наприклад в разі наявності шести факторів матриця повного факторного експерименту містить 64 досліди, з них один дослід використовується для визначення вільного члена, шість дослідів для визначення коефіцієнтів при лінійних членах, а 57 дослідів для перевірки адекватності моделі. Часто, в залежності від вибраного числа степенів свободи і від вибраної структури моделі, можливо оцінити адекватність моделі з використанням меншої кількості дослідів. Тоді можливо реалізувати тільки частину дослідів із повного факторного експерименту. Таку частину повного факторного експерименту називають *дробовим факторним експериментом*.

Припустимо, що в деякому повному факторному експерименті типу  $2^2$  є підстави вважати вплив ефектів взаємодії ( $b_{12}$ ) меншим за помилку експерименту. Тобто коефіцієнти при ефектах взаємодії можна прийняти рівним нулю. Тоді стовпець  $x_1x_2$  матриці (табл. 2.2) можна використати для третього фактору. Для цього, при реалізації дослідів даного експерименту, значення фактору  $x_3$  встановлюють у відповідності з рівнями вказаними у стовпчику для  $x_1x_2$  (табл. 2.2).

При цьому коефіцієнт розрахований за цим стовпчиком буде відображати вплив ефекту фактора  $x_3$  і ефекту взаємодії  $x_1x_2$ . Кажуть, що присутній ефект змішування. Це має місце в будь-якому плані з числом дослідів, меншим, ніж у повного факторного плану.

Таким чином, скорочення числа дослідів призводить до отримання змішаних оцінок для коефіцієнтів.

Таблиця 2.2 – Матриця повного факторного експерименту  $2^2$ 

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3 (x_1 x_2)$	$y$
1	+	+	+	+	$y_1$
2	+	-	+	-	$y_2$
3	+	+	-	-	$y_3$
4	+	-	-	+	$y_4$

Проте, якщо вплив ефекту взаємодії  $x_1 x_2$  в дійсності незначний (не перевищує похибку) і ним можна нехтувати, то можна вважати, що розрахований коефіцієнт за даним стовпчиком описує вплив фактора  $x_3$ . А модель буде мати вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

Для визначення коефіцієнтів даної моделі досить провести 4-ри досліди замість 8-ми в повному факторному експерименті типу  $2^3$ . План, який передбачає проведення половини дослідів повного факторного експерименту (ПФЕ) ще називають напівреплікою. Також можливо використання реплік більшої дробності в яких більше ефектів вважають, такими, що не суттєво проявляються при зміні значень факторів. Таким чином *дробовою реплікою* (ДР) є план, який уявляє собою частиною ПФЕ. Дробові репліки позначають виразом  $2^{k-p}$ . Де  $p$  – число лінійних ефектів, що прирівняні до ефектів взаємодії, тобто це фактори вставлені в стовпчики ефектів взаємодії.

Для того щоб підібрати дробову репліку, яка забезпечить максимальну кількість інформації, потрібно знати які коефіцієнти є сумісними оцінками лінійних ефектів і ефектів взаємодії. Для визначення цього спеціальні алгебраїчні вирази, які полегшують виявлення змішаних ефектів. Їх називають генерувальними співвідношеннями. Генерувальним називається співвідношення, що показує, які взаємодіючі фактори замінені новими (воно генерує, або створює ДР).

Наприклад, план типу  $2^{3-1}$  може бути представлений наступним генерувальним співвідношенням

$$x_3 = x_1 x_2;$$

Воно показує, що фактор  $x_3$  вставлений у стовпчик ефекта взаємодії  $x_1 x_2$ . Якщо помножити це генерувальне співвідношення на нову змінну  $x_3$  то отримаємо

$$x_3^2 = x_1 x_2 x_3;$$

Оскільки

$$x_i^2 = 1$$

то отримаємо наступний вираз

$$1 = x_1 x_2 x_3;$$

Якщо помножити  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , на даний вираз, то отримаємо наступні співвідношення:

$$x_1 = x_2 x_3; \quad x_2 = x_1 x_3; \quad x_3 = x_1 x_2.$$

Вони означають, що коефіцієнти регресії будуть оцінками

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12},$$

де  $\beta_0, \beta_1, \dots$  істинні коефіцієнти регресії при відповідних змінних, а  $b_1, b_2, \dots$  їх оцінки, тобто значення визначені наближено, що містять похибку експерименту.

Як видно з генерувальним співвідношенням, можна проводити алгебраїчні операції: множити обидві частини рівняння на будь-які ефекти - лінійні, подвійні, потрійні та інші взаємодії. При цьому отримані добутки називають *визначальним контрастом*. Визначальний контраст дає можливість встановити розрізнявальну здатність дробової репліки, тобто знайти, ті коефіцієнти які є незмішаними оцінками факторів. За прийнятим визначальним контрастом

одержують співвідношення, які задають змішані оцінки для даної дробової репліки. Для цього кожний фактор множать на визначальний контраст. При побудові дробових реплік застосовують наступне правило: новий фактор введений в план, треба помістити в стовпець матриці, що належить ефекту взаємодії, впливом якого можна нехтувати.

Дробові репліки широко застосовуються при створенні лінійних моделей. Ефективність застосування дробових реплік залежить від вдалого вибору системи змішування лінійних ефектів з ефектами взаємодії.

## **2.2. Завдання на підготовку до практичного заняття**

Для виконання завдання даного практичного заняття та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання.

1. Области використання повного факторного експерименту.
2. Можливості використання дробового факторного експерименту та ефективність його застосування у порівнянні з повним факторним експериментом.
3. Визначення факторів, встановлення інтервалів варіювання та кодування їх значень.
4. Побудова матриці планування експерименту.
5. Способи побудови матриць планування при збільшенні кількості факторів.
6. Оцінка розрізняювальної здатності дробової репліки.
7. Особливості вибору та розташування факторів в дробовій репліці планування з урахуванням їх можливого взаємного впливу. в залежності від умов конкретної задачі.

## **2.3. Контрольні питання.**

1. Дати характеристику повному та дробному факторному плану.
2. З яких міркувань вибирають величину інтервалу варіювання?
3. Які можливості надає досліднику проведення повного факторного експерименту.
4. Пояснити яким чином величина інтервалу варіювання впливає на значимість коефіцієнтів та адекватність моделі?
5. Які умови передбачають при застосуванні дробових реплік? Навести приклади.

6. Яким чином можна оцінити розрізнявальну здатність дробової репліки?

7. Яким чином отримують узагальнений контраст, що визначає розрізнявальну здатність дробної репліки?

#### **2.4. Матеріали і устаткування**

Визначальні контрасти для вибору дробної репліки отримують у викладача.

#### **2.5. Вказівки з техніки безпеки**

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

#### **2.6. Порядок виконання завдання практичного заняття**

Отримати у викладача завдання щодо оптимізації процесу термічної обробки. Проаналізувати можливість уточнення технологічних параметрів даного процесу за методикою планування експерименту. Скласти план експерименту з застосуванням дробної репліки для їх здійснення з метою отримання математичної моделі, що адекватно описувала б даний процес.

#### **2.7. Порядок оформлення звіту**

Мета роботи. Охарактеризувати повний факторний і дробний експерименти. Проаналізувати умови їх застосування. Вказати їх переваги та недоліки. Зробити висновки щодо випадків їх доцільного застосування.

#### **2.8. Література**

Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.— С 14-20.

### ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

#### Дослідження властивостей повного і дробового багатфакторних експериментів

**Мета роботи:** дослідити властивості повного і дробового факторних експериментів та з'ясувати особливості їх застосування.

#### 3.1 Загальні відомості

Основні властивості повного факторного плану першого порядку.

1. План побудований таким чином, що кожна незалежна змінна набуває в досліді тільки два значення (+1 чи -1), тобто варіюється на двох рівнях (верхньому і нижньому). Зокрема при двох факторах план має чотири досліді. В ньому присутні всі можливі парні комбінації двох рівнів обох факторів. Чотири досліді, що поставлені за таким планом, становлять повний факторний експеримент (ПФЕ). Його план скорочено позначається ПФЕ  $2^2$ .

2. При проведенні дослідів за планом ПФЕ можна знайти коефіцієнти не тільки лінійного рівняння регресії, але й такого, що містить коефіцієнти ефектів взаємодії.

3. Важлива особливість плану – некорельованість факторів. Вона базується на ортогональності матриці планування. Всі стовпці матриці планування (і весь план в цілому) ортогональні. З ортогональності однозначно випливає взаємна незалежність (некорельованість) всіх факторів і, відповідно, всіх коефіцієнтів рівняння регресії.

Вибір матриці планування у вигляді повного факторного експерименту при використанні як моделі полінома першого ступеня забезпечує оптимальне планування на підставі таких властивостей:

- коефіцієнти регресії визначаються незалежно один від одного; -
- дисперсії всіх коефіцієнтів регресії рівні і мінімальні;
- дисперсія вихідного параметра не залежить від обертання системи координат в центрі плану, а залежить тільки від радіуса досліджуваної сфери факторного простору (властивість ротатабельності).

Правильний вибір центра експерименту, інтервалів і рівнів варіювання факторів має вирішальне значення для достовірності побудованої математичної моделі. Основна вимога до інтервалу

варіювання полягає в тому, щоб він не був меншим за подвійну квадратичну похибку фактора. Ця вимога пов'язана з тим, що інтервал між двома сусідніми рівнями повинен значно впливати на вихідний параметр. Звичайно інтервал варіювання вибирається на підставі апріорної інформації і потім уточнюється після одержання математичної моделі. Вдалий вибір інтервалу варіювання факторів гарантує достовірність (адекватність) математичної моделі об'єкта.

Важливим елементом розробки плану експерименту є вибір числа рівнів для кожного фактора. Досить широко розповсюджена зміна факторів на двох рівнях, коли як рівні використовуються верхня і нижня границі інтервалу варіювання.

Для матриць таких експериментів характерні наступні властивості.

1. Властивість симетричності відносно центру експерименту - алгебраїчна сума елементів стовпця кожного фактору дорівнює нулю:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0,$$

де  $j$  - номер досліджу;  $i$  - номер фактору;  $N$  - число дослідів матриці.

2. Властивість нормування - сума квадратів елементів кожного стовпця дорівнює числу дослідів :

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 = N.$$

Ці дві зазначені властивості дозволяють швидко перевірити матриці на предмет помилок.

3. Властивість ортогональності - сума порядкових добутоків елементів будь-яких двох стовпців дорівнює нулю:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}x_{lj} = 0,$$

де  $i, l$  - номери факторів, причому  $i \neq l$ .

Ортогональність є однією з найбільш важливих властивостей матриці. Ортогональність матриці дозволяє оцінити усі коефіцієнти рівняння регресії незалежно один від одного, тобто величина будь-якого коефіцієнта не залежить від того, які величини мають інші коефіцієнти. Якщо той або інший коефіцієнт виявиться незначимим, то його можна відкинути, не перераховуючи інші коефіцієнти.

4. Властивість ротатабельності матриці забезпечується тим, що точки в матриці планування підбирають так, щоб математична модель, отримана за результатами повного або дробового факторних експериментів, могла передбачати значення параметра оптимізації з однаковою точністю у будь-яких напрямках на рівних відстанях від центру експерименту. Це дуже важлива властивість матриці, оскільки, починаючи експеримент, дослідник не знає, в якому напрямку потрібно буде рухатися у пошуках оптимуму.

### 3.2. Завдання на підготовку до практичного заняття

Для виконання завдання практичного заняття та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання.

1. Симетричність плану відносно центру.
2. Властивість нормування.
3. Ортогональність матриці планування.
4. Ротатабельність матриці планування.
5. Приклади використання наведених властивостей при застосуванні МПЕ.

### 3.3. Контрольні питання

1. Які переваги надає симетричність плану відносно центру?
2. Які можливості набуває план експерименту якщо виконується вимога нормування?
3. Яким чином ортогональність впливає на корельованість факторів.
4. Які переваги та недоліки має ротатабельний план експерименту над ортогональним?

### 3.4. Матеріали і устаткування

Отримати у викладача план експерименту у виді дробної матриці.

### **3.5. Вказівки з техніки безпеки**

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

### **3.6. Порядок виконання завдання до практичного заняття**

У відповідності з завданням отриманим у викладача здійснити аналіз властивостей плану експерименту. Сформулювати висновки за результатами опрацьованих питань. Оформити звіт.

### **3.7. Порядок оформлення звіту**

Мета роботи, загальні відомості. Дати характеристику властивостям матриці проведення експерименту і вказати приклади їх застосування. Відмітити переваги і недоліки методу планування експерименту в порівнянні з класичною методикою проведення експерименту. Зробити висновки за отриманими результатами.

### **3.8. Література**

Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.— С 20-23.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

### Методика проведення експерименту і обробка результатів дослідів

**Мета роботи:** Опанувати методику проведення експерименту і обробку результатів дослідів при їх рівномірному дублюванню та відсутності останнього.

#### 4.1 Загальні відомості

Після вибору плану експерименту, основних рівнів та інтервалів варіювання факторів переходять до експерименту. Кожен рядок матриці - це умови певного дослідів. Для оцінки випадкових похибок кожен дослід рекомендується повторити  $n$  разів. Досліди, повторені кілька разів при тих самих значеннях факторів, називають паралельними. Під дублюванням розуміють постановку паралельних дослідів. Звичайне число  $n$  паралельних дослідів приймають рівним 2-3, іноді 4-5. При проведенні досліджень часто доводиться мати справу із такими варіантами дублювання дослідів: а) експеримент проведений при рівномірному дублюванні дослідів; б) експеримент поставлений без дублювання дослідів.

**При рівномірному дублюванні дослідів** всі рядки матриці планування мають однакову кількість паралельних дослідів. При відсутності дублювання паралельні дослідів проводяться тільки коли значення факторів дорівнюють нульовому рівню. Найбільш сприятливим із даних варіантів дублювання є перший. При цьому варіанті експеримент відрізняється підвищеною точністю, а математична обробка експериментальних даних - простотою. Для кожного рядка матриці планування по результатам  $n$  паралельних дослідів знаходять середнє арифметичне значення параметра оптимізації. Далі для кожного рядка матриці планування розраховують дисперсію ( $s$ ) за результатами  $n$  паралельних дослідів. Для вилучення результатів, що наймовірні, використовують спеціальні критерії, зокрема критерій трьох  $\sigma$  або критерій Романовського.

Однорідність ряду дисперсій перевіряють за критерієм Кохрена або за критерієм Бартлета.

За результатами експерименту обчислюють коефіцієнти. Коефіцієнти рівняння регресії це оцінки теоретичних коефіцієнтів. Оцінки, знайдені за допомогою методу найменших квадратів, є найкращими в тому розумінні, що вони обчислені з найменшими

можливими дисперсіями. Обчисливши коефіцієнти моделі, перевіряють їх значимість. Перевірку значимості коефіцієнтів можна робити двома способами: 1) порівнянням абсолютної величини коефіцієнта з довірчим інтервалом; 2) за допомогою t-критерію Стьюдента. Статистично незначущі коефіцієнти можуть бути виключені з рівняння.

Після розрахунку коефіцієнтів моделі й перевірки їх значимості визначають дисперсію адекватності. Залишкова дисперсія або дисперсія адекватності, характеризує розсіювання емпіричних значень у відносно розрахункових  $y_p$ , що знайдені за рівнянням регресії. Наступним етапом обробки результатів експерименту є перевірка гіпотези адекватності знайденої моделі. Перевірку цієї гіпотези роблять за F-критерієм.

**Обробка результатів експерименту при відсутності дублювання дослідів.** Частіше використовують саме цей варіант, оскільки він більш економічний порівняно з попереднім. Обробку результатів експерименту в цьому випадку роблять за наступною схемою.

1. Для обчислення дисперсії відтворюваності експерименту виконують кілька паралельних дослідів у центрі плану. При постановці дослідів у центрі плану всі фактори перебувають на нульових рівнях. За результатами дослідів у центрі плану обчислюють дисперсію відтворюваності експерименту.

2. Закінчивши експеримент, обчислюють коефіцієнти моделі. Вільний член  $b_0$  визначають за формулою

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j.$$

Коефіцієнти регресії, що характеризують лінійні ефекти, обчислюють за наступною формулою

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j.$$

Коефіцієнти регресії, що характеризують ефекти взаємодії визначають за формулою

$$b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j,$$

де  $il$  - номери факторів;  $j$  - номер рядка або дослідів в матриці планування;  $y_j$  - значення параметра оптимізації в  $j$ -му досліді;  $x_{ij}, x_{lj}$  - кодовані значення ( $\pm 1$ ) факторів  $i$  й  $l$  в  $j$ -му досліді.

3. Перевіряють статистичну значимість коефіцієнтів рівняння регресії. Перевірку значимості коефіцієнтів можна проводити двома способами: а) порівнянням абсолютної величини коефіцієнта з довірчим інтервалом; б) за допомогою  $t$ -критерія.

При перевірці значимості коефіцієнтів першим способом для визначення довірчого інтервалу обчислюють дисперсії коефіцієнтів регресії за формулою

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{N} s_y^2,$$

де  $s^2\{b_i\}$  - дисперсія  $i$ -го коефіцієнта регресії рядків або дослідів у матриці планування. Ця дисперсія вважається однаковою для всіх коефіцієнтів. Довірчий інтервал  $\Delta b_i$  - визначають за формулою

$$\Delta b_i = \pm t_{\alpha} s\{b_i\},$$

Значення  $t$ -критерію, що входить у цю формулу, знаходять по таблиці для прийнятого рівня значимості й числа ступенів свободи  $f$ , що визначають за формулою

$$f = N - (k + 1),$$

де  $k$  - число факторів.

Коефіцієнт регресії вважається значимим, якщо його абсолютна величина більше довірчого інтервалу  $\Delta b_i$ .

Статистично незначущі коефіцієнти можуть бути виключені з рівняння регресії.

4. Визначають дисперсію  $s_{ад}^2$ , адекватності за формулою

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)}$$

де  $y_j$  – експериментальне значення параметра оптимізації в  $j$ -му досліді;  $\hat{y}_j$  – значення параметра оптимізації, обчислене за моделлю;

для умов  $j$ -го досліді;  $f$  – число ступенів свободи, що для лінійної моделі визначається за виразом  $f=N-(k+1)$ , де  $k$  – число факторів.

5. Перевіряють гіпотезу адекватності моделі за F-критерієм, використовуючи для визначення  $F_p$ -критерію наступну формулу:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_{\mu}^2}$$

Якщо  $F_p < F_T$  для прийнятого рівня значимості й відповідних чисел ступенів свободи, то модель вважають адекватною. При  $F_p > F_T$  гіпотеза адекватності відкидається. У цьому випадку для одержання адекватної моделі приймають одне з наступних рішень: а) переходять до планування другого або більш високого порядку моделі;

б) зменшують інтервали варіювання й ставлять новий експеримент, повторюючи ці дії до одержання адекватної лінійної моделі. Якщо лінійна модель адекватна, то переходять до методу крутого сходження.

#### 4.2 Завдання на підготовку до практичного заняття

Для виконання завдання практичного заняття та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання.

1. Дисперсія її розрахунок та застосування у статистиці.
2. Способи вилучення грубих похибок.
3. Способи перевірки однорідності дисперсій.
4. Метод найменших квадратів.
5. Застосування критерію Кохрена для перевірки однорідності дисперсій та критерію Фішера для перевірки адекватності регресійної моделі.

### 4.3 Контрольні питання

1. Охарактеризувати випадок дублювання дослідів в кожному рядку матриці і випадок дублювання дослідів тільки у центрі плану.
2. Яким чином розраховують дисперсії дослідів та адекватності моделі?
3. Яким чином перевіряють дисперсії на однорідність?
4. Які варіанти дій можна запропонувати при неоднорідності дисперсій?
5. За яким методом здійснюють розрахунки коефіцієнтів моделі?
6. За яким критерієм перевіряють модель на адекватність?
7. Які рішення можуть бути прийняті у випадку отримання адекватної і не адекватної моделей?

### 4.4 Матеріали і устаткування

Результати експерименту з оптимізації процесу термічної обробки отримані у викладача.

### 4.5 Порядок виконання завдання практичного заняття

Виявити і виключити неймовірні похибки з отриманих даних. Провести розрахунки коефіцієнтів рівняння, оцінити їх значущість, перевірити адекватність рівняння, сформулювати рішення щодо подальшого проведення оптимізації даного процесу.

### 4.6 Міст звіту

Мета роботи, загальні відомості. Аналіз отриманих результатів. Висновки щодо застосовуваних критеріїв для виявлення і виключення неймовірних похибок, однорідності дисперсій та адекватності моделі.

### 4.7 Література

1. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.— С 21-32
2. Адлер Ю.П., Маркова ЕВ., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 279 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

### Використання методу крутого сходження по поверхні відгуку для рішення задач з оптимізації.

**Мета роботи:** Опанувати застосування методики крутого сходження для рішення задач з оптимізації.

#### 5.1 Загальні відомості

Відомо, що найбільш короткий шлях - це рух за градієнтом, тобто перпендикулярно лініям рівного рівня, на яких функція відгуку приймає постійні значення. У зв'язку із цим при оптимізації процесу робочий рух доцільно робити в напрямку найбільш швидкого зростання функції відгуку, тобто в напрямку градієнта функції у.

Згадаємо, що градієнтом називають вектор, який показує напрямок найшвидшої зміни деякої величини, значення якої змінюється від однієї точки простору до іншої. Градієнт ( $\vec{\nabla}\varphi$ ) непереривчастої однозначної функції  $\varphi$  є вектор:

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial x_2} \vec{j} + \dots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_k} \vec{k},$$

де -  $\frac{\partial\varphi}{\partial x_i}$  - частинна похідна функції по  $i$  фактору;

$\vec{i}, \vec{j}, \dots, \vec{k}$  - одиничні вектори в напрямку осей факторів.

Відповідно до теореми Тейлора про розкладання аналітичної функції в ряд частинні похідні функції по факторах дорівнюють за величиною і знаком відповідним коефіцієнтам регресії. Значить градієнтом функції відгуку є вектор

$$\vec{\nabla}y = b_1\vec{i} + b_2\vec{j} + \dots + b_k\vec{k}.$$

Рух за градієнтом забезпечує найбільш короткий шлях до оптимуму, оскільки напрям градієнта - цей напрям самого крутого схилу, що веде від цієї точки до вершини. Якщо змінювати фактори пропорційно їх коефіцієнтам з урахуванням знаку, то рух до оптимуму здійснюватиметься по найкрутішому шляху. Цей процес руху до області оптимуму називають крутим сходженням. Техніку розрахунку крутого сходження розглянемо на прикладі завдання з одним чинником

х. Припустимо, що крива 1 є невідомою функцією відгуку. В результаті реалізації плану експерименту з центром в точці  $O$  отримано рівняння регресії

$$y = b_0 + b_1 x_1,$$

що адекватно описує функцію відгуку в області значень фактора  $x_1$  від  $-1$  до  $+1$ . Значення коефіцієнта регресії  $b_1$  рівне тангенсу кута між лінією регресії і віссю даного фактору. Якщо крок руху по осі  $x_1$  прийняти рівним  $\Delta x$ , то, помноживши його на  $b_1$ , отримаємо координати  $(\Delta x \text{ і } b_1 \Delta x)$  точки  $A$ , що лежить на градієнті. Після другого кроку відстань по осі  $x_1$  буде рівна  $2\Delta x$ . Помноживши  $2\Delta x$  на  $b_1$ , знайдемо координати  $2\Delta x$  і  $2b_1 \Delta x$  точки  $B$ , що лежить на градієнті, і т.д. Потім проводять дослід з умовами, що відповідають точкам на градієнті. За результатами цих дослідів визначають область оптимуму. У практичних завданнях для скорочення об'єму експерименту проводять не усі, а тільки частину дослідів передбачених крутим сходженням. Умови дослідів вибирають так, щоб область оптимуму можливо було заключити між мінімальним і максимальним значеннями фактору. Після цього досліді проводять в точках інтервалу, утвореного точками мінімального і максимального значень фактору, до знаходження найкращого результату.

У разі  $k$  чинників розрахунок крутого сходження по осі кожного фактору виконують аналогічним чином, оскільки коефіцієнти  $b_i$  визначаються незалежно один від одного. При цьому рух по осям усіх факторів здійснюють одночасно.

Крок руху по градієнту вибирають таким, щоб його мінімальне на величину була більше похибки з якою фіксують фактор. Максимальну величину кроку обмежує область визначення фактора. Необхідно враховувати, що при русі до оптимуму малий крок приводить до значного числа дослідів, а великий крок може привести до проскоку області оптимуму. Крок руху вибирають для одного фактору, а для інших його розраховують за виразом

$$\Delta_i = \Delta_1 \frac{b_i \varepsilon_i}{b_1 \varepsilon_1},$$

де  $\Delta_l$  - вибраний крок руху для фактору  $l$ ;  $\Delta_i$  - крок руху для  $i$  - фактору;  $b_i, b_l$  - коефіцієнти регресії  $i$  - го і  $l$  - го факторів;  $\varepsilon_i, \varepsilon_l$  - інтервали варіювання  $i$  - го і  $l$  - го факторів.

Рух по градієнту повинен починатися від нульової точки (основного рівня кожного фактору) оскільки коефіцієнти регресії вичислені для функції відгуку, розкладеною в ряд Тейлора в околиці нульової точки. Якщо коефіцієнти регресії значно відрізняються один від одного, то рекомендують змінити інтервали варіювання факторів і провести нову серію дослідів, бо при відмінності коефіцієнтів на порядок і більше багатфакторний експеримент при крутому сходженні може перетворитися на однофакторний. Розрахувавши крок руху для кожного фактору знаходять (шляхом розрахунку) умови "уявних" дослідів. "Уявними" називають дослідів, умови проведення яких на стадії крутого сходження встановлені з урахуванням кроку руху для кожного фактору шляхом розрахунку за лінійним рівнянням регресії.

З метою перевірки результатів крутого сходження частина «уявних» дослідів реалізується фізично, що дозволяє скоротити об'єм реальних дослідів, тобто збільшити швидкість просування до екстремуму. При "уявному" експерименті" переклад координат у кодовану форму та підстановка їх значень у рівняння моделі об'єкта повинна підтвердити дійсне зростання  $y$ . Звичайно реальні дослідів на початку руху з центру плану уздовж напрямку градієнта передбачаються через 2-4 уявних дослідів. Реальні дослідів виконують на практиці, визначаючи, таким чином, послідовність значень  $y$  у напрямку градієнта. З дослідних даних знаходять положення локального екстремуму.

В околиці локального екстремуму ставлять нову серію дослідів (ПФЭ або ДФЭ) для визначення нових значень коефіцієнтів рівняння регресії й нового напрямку градієнта. Надалі процедура повторюється до досягнення наступного локального екстремуму аж до визначення околиці координат максимуму функції відгуку, яку називають майже стаціонарною областю.

Ознакою досягнення цієї області є статистична не значимість коефіцієнтів  $b_i$ . У майже стаціонарній області стають значимі ефекти взаємодії й квадратичні ефекти і тому потрібно переходити від застосування ДФЭ (якщо він використався раніше) до ПФЭ, а якщо й

цього виявиться недостатньо для отримання адекватної моделі, перейти від планів експерименту першого порядку до планів другого порядку.

Якщо при русі до оптимуму виникає ситуація, що унеможлиблює зміну яких-небудь факторів, то ці фактори можна фіксувати на оптимальних рівнях, продовжуючи рух зміненням інших факторів. Круте сходження припиняється, якщо знайдені умови оптимізації або якщо обмеження на фактори роблять подальший рух по градієнту безрозсудним.

Очевидно, що в задачах, де потрібно визначити координати не максимуму, а мінімуму функції відгуку, знаки коефіцієнтів  $b_i$  варто поміняти на зворотні. У цьому випадку здійснюється рух по антиградієнту у факторному просторі.

### 5.2. Завдання на підготовку до практичного заняття

Для виконання завдання практичного заняття та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати наступні питання.

1. Теорема Тейлора та поняття руху за градієнтом в напрямку оптимуму.
2. Вибір величини кроку руху за градієнтом.
3. Розрахунок значень факторів для проведення дослідів руху за градієнтом.
4. Стратегія проведення дослідів руху за градієнтом.

### 5.3. Контрольні питання

1. Яким чином в даному випадку використовують теорему Тейлора?
2. Охарактеризуйте градієнт функції.
3. В чому полягає сутність методу руху за градієнтом?
4. З якої точки починають, зазвичай, рух за градієнтом?
5. З яких міркувань вибирають крок для факторів?
6. Пояснити терміни «уявні» і реальні досліді.
5. Вказати можливі варіанти рішень при досягненні екстремуму.
6. Описати методику проведення розрахунків для визначення умов реалізації дослідів при здійсненні руху за градієнтом.

### 5.4. Матеріали і устаткування

Результати проведення дослідів за ПФЕ або за ДФЕ отримані у викладача.

### **5.5. Вказівки з техніки безпеки.**

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

### **5.6. Порядок виконання завдання практичного заняття**

1. У відповідності з вимогами задачі, отриманої у викладача, провести вибір кроку для одного фактору і розрахувати значення кроків для інших факторів. Визначити умови проведення «умовних» дослідів. Вибрати досліди для фізичної реалізації.

### **5.7. Порядок оформлення звіту**

Мета роботи. За результатами фізично-реалізованих дослідів вказати можливі рішення задачі. Сформулювати висновки за результатами роботи.

### **5.8. Література**

Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.— С 32-38.

**ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6**  
**Методика дослідження впливу факторів при використанні моделі у вигляді рівняння ступеневого виду**

**Мета роботи:** опанувати методику застосування МПЕ з використанням рівняння ступеневого виду.

**6.1. Загальні положення**

При дослідженні процесів термічної обробки багато залежностей можна описати рівняннями ступеневого виду. Наприклад, залежність теплостійкості штампової сталі від параметрів режиму нагрівання та охолодження можливо описати рівнянням

$$T = c v^{\alpha} s^{\beta} t^{\gamma}, \quad (6.1)$$

де  $v$  – температура гартування;  $s$  – час витримки при температурі гартування;  $t$  – температура відпуску; а  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – постійні величини.

Рівняння (1) можна лінеаризувати за допомогою логарифмування:

$$\ln T = \ln c + \alpha \ln v + \beta \ln s + \gamma \ln t \quad (6.2)$$

На першому етапі рівняння (2) можна виразити у виді лінійного поліному:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (6.3)$$

де  $y$  – значення відгуку ( $\ln T$ ), а  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – кодовані значення  $v$ ,  $s$ ,  $t$  відповідно. А якщо цього буде недостатньо для отримання адекватної моделі, то її можна ускладнювати, наприклад, до квадратичної. В даному випадку кодування значень факторів здійснюють за формулою

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i_B})}{\ln \tilde{x}_{i_B} - \ln \tilde{x}_{i_H}} + 1 \quad (6.4)$$

де  $x_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактору;  $x_B$ ,  $x_H$  – натуральні значення верхнього і нижнього рівнів факторів відповідно.

Для оцінки коефіцієнтів рівняння (3) доцільно використати результати багатфакторного експерименту.

Після визначення коефіцієнтів рівняння (3) необхідно перевірити гіпотезу його адекватності. Якщо гіпотеза підтверджується, тобто рівняння (3) є адекватним, то підставляючи в це рівняння значення  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , обумовлені співвідношенням (4), одержимо вираз (2), який можна буде використовувати як математичну модель даного процесу. Якщо гіпотеза адекватності рівняння не підтверджується, то необхідно запропонувати іншу модель, зокрема врахувати можливі ефекти взаємодії, або підвищити ступінь поліному.

Як правило, дисперсію відтворюваності обчислюють за результатами дослідів у центрі плану. Адекватність перевіряють за критерієм Фішера. Рівняння в кодованих величинах можливо перетворити в натуральні величини і виконати потенціювання.

Таким чином є можливість отримати ступеневу модель реалізацією кількості дослідів необхідних для створення лінійної моделі.

### **6.2 Завдання на підготовку до практичного заняття**

Для виконання завдань та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання.

1. Методика ліанерізації рівняння ступеневого виду.
2. Спосіб кодування значень факторів при застосуванні рівняння ступеневого виду.
3. Перевірка адекватності рівняння регресії при проведенні паралельних дослідів тільки на нульовому рівні.

### **6.3 Контрольні питання**

1. Обґрунтувати доцільність застосування ступеневого рівняння у дослідженні технологічних процесів.

2. З якою метою та у який спосіб здійснюється ліанерізація ступеневого рівняння?

3. За якими властивостями вибирають матриці в даному випадку?

4. Яким чином здійснюється перевірка адекватності рівняння регресії?

5. Яким чином можна використати адекватне рівняння регресії і які можна надати рекомендації у випадку якщо дане рівняння виявиться адекватним і неадекватним?

#### **6.4. Матеріали і устаткування**

Результати дослідів по дослідженню властивостей сталі.

#### **6.5. Вказівки з техніки безпеки.**

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

#### **6.6 Порядок виконання завдання практичного заняття**

Опрацювати результати дослідів відповідно до завдання виданого викладачем.

#### **6.7. Зміст звіту**

Мета роботи, аналіз отриманих результатів з застосуванням теоретичних відомостей щодо впливу досліджених факторів на теплостійкість сталі. Висновки за результатами опрацьованих питань.

#### **6.8. Література**

1. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.— С 169-171.
2. Планування і обробка даних наукового експерименту: Конспект лекцій /В.В. Полтавець. — Донецьк: ДВНЗ ДонНТУ, 2008 — 52 с.
3. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту. Навч. посібник. — Львів: Видав. ДУ «ЛП», — 2000. — 205 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7

### Дослідження випадків доцільності використання планів другого порядку

**Мета роботи:** з'ясувати випадки доцільного використання та методику застосування планів другого порядку при плануванні експериментів.

#### 7.1. Загальні відомості

Функцію відгуку в області оптимуму, як правило, вдається апроксимувати поліномом другого ступеня. Для оцінки всіх коефіцієнтів полінома другого ступеня необхідно, щоб у плані експерименту кожен фактор приймав не менш трьох значень. Проте застосування планів типу  $3^k$  пов'язане з значним числом дослідів. Як показали дослідження більш раціональним є центральне композиційне планування. Його раціональність обумовлена тим, що досліди проводять серіями. І якщо, наприклад, після першої серії отримана лінійна адекватна модель, то не потрібно виконувати наступну серію дослідів для удосконалення моделі, внаслідок чого маємо економію витрат на роботу.

Такі можливості, зокрема, надає застосування центральних композиційних планів. Центральний композиційний план другого порядку одержують додаванням деякої кількості точок (їх називають зірчастими) до «ядра», утвореного лінійним планом. При числі  $k$  факторів менш п'яти за «ядро» центрального композиційного плану звичайно приймають план повного факторного експерименту типу  $2^k$ . Якщо число факторів більше п'яти, то за «ядро» центрального композиційного плану приймають напіврепліку від повного факторного експерименту типу  $2^k$ . Такий вибір «ядра» центрального композиційного плану обумовлений тим, що від «ядра» плану потрібна роздільна оцінка всіх лінійних ефектів і парних ефектів взаємодії. Загальне число  $N$  дослідів центрального композиційного плану другого порядку залежить від числа  $k$  факторів і визначається за виразом  $N=2^k + 2k + n_0$ . Величину «зірчастого» плеча  $\alpha$ , тобто значення фактора в точці  $\alpha$ , й число дослідів в центрі плану вибирають залежно від прийнятого критерію оптимальності.

За критерій оптимальності звичайно приймають ортогональність або ротатабельність плану. У перших роботах, присвячених дослідженню області оптимуму за аналогією з ортогональними планами першого порядку використовували ортогональні плани другого порядку. Перевага; ортогональних планів полягає в малому об'ємі обчислень, так як всі коефіцієнти регресії визначаються незалежно один від одного. Ортогоналізація досягається вибором «зірчатого» плеча  $\alpha$ . Якщо ортогональність прийняти за достатній критерій оптимальності плану експерименту, то на число дослідів у центрі плану не накладається якого-небудь обмеження, і звичайно  $n_0=1$ .

Завдяки ортогональності матриці планування коефіцієнти регресії визначаються незалежно один від одного.

Адекватність рівняння одержуваного після центрального композиційного ортогонального планування, здійснюється так само, як і перевірка адекватності лінійної моделі, отриманої при реалізації плану першого порядку.

**Ротатабельне планування другого порядку.** Критерій ортогональності не завжди є досить задовільним критерієм оптимізації центрального композиційного плану другого порядку. Оскільки при його застосуванні точність інформації про поверхню відгуку, що отримана при ортогональному плануванні другого порядку, різна в різних напрямках. У той же час дослідник, починаючи експеримент, найчастіше не знає, який напрямок, буде становити для нього переважний інтерес. У тих випадках, коли немає достовірної інформації про напрямок подальшого руху по поверхні відгуку, найбільш розумним є використання центральних композиційних планів, що відповідають вимогі ротатабельності, тобто планів, що дозволяють одержувати модель, здатну передбачати значення параметра оптимізації з однакової точністю незалежно від напрямку на рівних відстанях від центра плану. Ротатабельність центрального композиційного плану досягається вибором величини «зірчатого» плеча. Величину зірчатого плеча для «ядра», що містить повний факторний експеримент, визначають за співвідношенням:

$$\alpha = 2^{\frac{k}{4}}$$

Також має значення вибір числа дослідів у центрі плану, тому що число дослідів у центрі плану визначає характер розподілу отримуємої інформації про поверхню відгуку. Число дослідів у центрі плану

вибирається таким, щоб забезпечувалося так назване уніформ-планування. Планування називається уніформ-ротатабельним, якщо одержувана інформація постійно залишається в нутрі інтервалу  $0 < \rho < 1$ , де  $\rho$  - радіус інформаційного контуру. Уніформ-ротатабельне планування можливе, якщо деяка константа  $\lambda$  не перевищує одиниці (не набагато менше 1).

$$\lambda = \frac{k(n_c + n_0)}{(k + 2)n_c},$$

де  $n_0$  - число дослідів у центрі плану (число нульових точок);  
 $n_c = N - n_0$ ;  $N$  - загальне число дослідів;  $k$  - число факторів.

Матриці ротатабельного планування другого порядку не ортогональні, тому об'єм обчислювальної роботи при визначенні коефіцієнтів регресії доволі великий. Тому обчислення коефіцієнтів регресії рекомендується проводити за допомогою електронних обчислювальних машин, з використанням методу найменших квадратів і відповідних програм.

Обчисливши коефіцієнти рівняння регресії, визначають їх довірчі інтервали. Після цього, виключивши з рівняння статистично незначущі коефіцієнти, одержують математичну модель. Адекватність отриманої моделі перевіряють за допомогою розрахункового критерію Фішера. Якщо гіпотеза адекватності моделі не приймається, то застосовують планування третього порядку або повторюють всі досліди, звузивши інтервали варіювання або змінивши основні рівні факторів.

Є випадки коли до здійснення експерименту на основі апріорної інформації відомо, що досліджуємий процес, при вибраних значеннях інтервалів варіювання факторів, неможливо описати лінійним поліномом, а потрібно використовувати поліном другого порядку. В цьому разі, для одержання моделі можуть бути більш раціональнішими некомпозиційні плани порівняно з центральними композиційними планами другого порядку.

Цей план є ротатабельним і за числом дослідів більш економічний порівняно з відповідним композиційним ротатабельним планом другого порядку.

Достоїнство описуваного плану в тому, що, наприклад, при двох факторах, він вимагає для фактору  $x_1$  використання п'яти рівнів (+1;

+0,5; 0; -0,5; -1), а для фактору  $x_2$  - усього трьох рівнів (+0,866; 0; -0,866). В той час, як центральний композиційний ротатабельний план другого порядку передбачає зміну обох факторів на п'яти рівнях (+1,414; +1; 0; -1; -1,414). На практиці число рівнів часто виявляється обмеженим і зменшення числа рівнів факторів дозволяє економити витрати на проведення експериментів.

Розглянуті плани не є повністю ортогональними так, як коефіцієнти при вільному члені і при квадратичних членах корельовані. Для числа факторів від двох до семи плани являють собою певні вибірки рядків з повного факторного експерименту типу  $3^k$ . Використання некомпозиційних планів, що передбачають усього три рівня варіювання факторів, спрощує й зменшує коштовність проведення експерименту порівняно з композиційними. Некомпозиційні плани характеризуються наявністю у їх у рядках матриці планування великої кількості нулів, у результаті чого істотно спрощується обчислення коефіцієнтів моделі. Крім того, некомпозиційні плани для 3, 4, 6 й 7 факторів вимагають постановки меншого числа дослідів у порівнянні з відповідними ротатабельними центральними композиційними планами другого порядку.

Некомпозиційні плани для числа факторів від трьох до семи мають високий ступінь ортогональності, а саме: тільки вільний член  $b_0$  і коефіцієнти  $b_i$  при квадратичних членах корельовані один з одним. При чотирьох і сімох факторах зазначені плани є ротатабельними, а при іншому числі факторів ці плани є майже ротатабельними.

## 7.2. Завдання на підготовку до практичного заняття

Для виконання завдання практичного заняття та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання.

1. Центральні композиційні плани.
2. Некомпозиційні плани другого порядку. Їх переваги та недоліки у порівнянні з композиційними планами.
3. Ортогональні плани другого порядку.
4. Ротатабельні плани другого порядку. Їх переваги та недоліки у порівнянні з ортогональними планами.
5. Методика використання планів другого порядку при дослідженні області оптимуму.

### 7.3. Контрольні питання

1. Наведіть приклади раціонального використання центральних композиційних планів.
2. Наведіть приклади раціонального використання не композиційних планів.
3. Як розрахувати число дослідів центрального композиційного плану?
4. З яких міркувань вибирають число дослідів в центрі плану?
5. З яких міркувань встановлюють значення зірчастого плеча?
6. Якими чинниками керуються при встановленні кількості дослідів в центрі плану?
7. Охарактеризуйте переваги і недоліки ортогональних та ротатабельних планів другого порядку.
8. Яким чином можна перевірити адекватність рівняння регресії другого порядку?
9. Яким чином досягається ротатабельність плану другого порядку?
10. Охарактеризуйте уніформ-ротатабельне планування.
11. Які варіанти рішень можуть бути прийняті при отриманні не адекватної моделі?
12. Яким чином можна використовувати адекватну модель другого порядку?

### 7.4. Матеріали і устаткування

Плани проведення експерименту і результати дослідів.

### 7.5. Вказівки з техніки безпеки

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

### 7.6. Порядок виконання завдання практичного заняття

Провести обробку отриманих експериментальних даних та їх аналіз.

### 7.7. Порядок оформлення звіту

Мета роботи, загальні відомості. Дати характеристику властивостям планів другого порядку. Описати їх застосування при проведенні досліджень. Проаналізувати результати отриманих досліджень. Сформулювати висновки за отриманими результатами.

### 7.8 Література

1. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.— С 63-78.
2. Планування і обробка даних наукового експерименту: Конспект лекцій /В.В. Полтавець. - Донецьк: ДВНЗ ДонНТУ, 2008 – 52 с.
3. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту. Навч. посібник. - Львів: Видав. ДУ «ЛП», - 2000. - 205 с.
4. Аністратенко В.О., Федоров В.Г. Математичне планування експерименту в АПК. - К.: Вища школа, 1993. - 375 с.
5. Теория инженерного эксперимента: текст лекций/ А.К. Бояршинова, А.С. Фишер. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. - 85 с.

## Додаток А

### **Правила із техніки безпеки при виконанні практичних робіт**

1. Роботу починають виконувати тільки з дозволу викладача.
2. До роботи з обладнанням допускаються особи, які вивчили конструктивні особливості та технічний опис конкретної випробувальної машини, а також пройшли перевірку знань електричної техніки безпеки.
3. На обладнанні механічної лабораторії можуть працювати особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки та мають допуск на право виконання робіт на обладнанні лабораторії.
4. В термічній та препараторських лабораторіях можуть працювати особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки та визначили конструктивні особливості печей та витяжних шаф. Всі струмопровідні частини електропечей повинні бути ізольовані та огорожені, а інші неструмопровідні частини – надійно заземлені.

### **Вимоги безпеки перед початком роботи**

1. Вивчити інструкцію з виконуємої роботи.
2. Перевірити наявність необхідних приладів та інструментів.
3. Доповісти викладачеві про можливість виконання роботи.
4. Студенти не повинні приступати до роботи, доки не одержать інструктаж з техніки безпеки.
5. Робота біля електроприладів повинна виконуватись з використанням ізоляційних засобів (діелектричні килимки, ізоляційні підставки).
6. Перевірити справність приладів та обладнання печі, підготувати до роботи інструмент, вантажнозахватні пристрої та впевнитись в їх справності.
7. Завантаження та розвантаження виробів виконувати за допомогою спеціального захватного знаряддя.
8. Якщо встановлена несправність печі, необхідно повідомити викладача.
9. Проведення ремонту обладнання самостійно студентами забороняється.

### **Вимоги безпеки під час виконання роботи**

1. Забороняється студентам вмикати та вимикати електричні прилади та електропечі без дозволу керівника лабораторних робіт.
2. Усякі ремонти, налагодження електрообладнання необхідно виконувати електриковому, що обслуговує лабораторію.
3. Забороняється працювати в лабораторії на самоті. Обов'язкова присутність керівника лабораторних робіт. Вмикання, зміна режимів роботи установки, проведення замірів та вимикання установки для запобігання несправностей, необхідно виконувати тільки з дозволу викладача в суворій відповідності з положенням, наведеному у технічному описанні.
4. Особам, які не закріплені за даною установкою, виконувати будь-які ремонтні роботи забороняється.

### **Вимоги безпеки в термічній та препаратурських лабораторіях**

1. Вмикання та вимикання електричного обладнання повинно здійснюватись тільки з дозволу викладача, який проводить заняття.
2. При виявленні несправності усіх видів слід негайно припинити роботу.
3. Забороняється ремонтувати обладнання студентам та особам, які не мають кваліфікаційної групи по ТБ.
4. Завантаження та розвантаження печей дозволяється тільки у вимкненому стані.
5. Працювати при несправному заземленні і без діелектричного килимка забороняється.

### **Вимоги безпеки після закінчення роботи**

Після проведення випробувань в механічній лабораторії необхідно: відключити усі секції установок від електропостачання та вимкнути прилади.

В термічній та препаратурських лабораторіях після закінчення робіт необхідно вимкнути печі, вимкнути вентиляцію, рубильник електропостачання, прибрати робочі місця

### **Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

При пожежі чи загорянні необхідно:

1. Викликати пожежну частину за телефоном 01.
2. Вимкнути електромережу, вентиляцію, обладнання.
3. Сповістити керівника лабораторії і викладача.

**Негайно покинути приміщення лабораторії**