

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни «Моделювання в триботехніці»
для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої
програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і
конструкцій» всіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання в триботехніці» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання / Укл. М.М. Бриков. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 36 с.

Укладачі: М.М. Бриков, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: О. Г. Биковський, д-р техн. наук, проф.

Редактор: І.П. Аверченко

Відповідальний за випуск: М.М. Бриков, д-р техн. наук, проф.

Помічник завідуючого кафедрою з методичної роботи:
С.М. Попов д. ф. н., проф.

Затверджено

на засіданні кафедри ОТЗВ

Протокол № 2 від 20.10.2021

Рекомендовано до видання

НМК ІФФ

Протокол № 3 від 09.11.2021

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1 Застосування аналізу розмірностей для фізичного моделювання систем	4
Лабораторна робота №2 Застосування теорії подібності для фізичного моделювання систем	10
Лабораторна робота №3 Пошук оптимуму методами планування експерименту	15
Вказівки з техніки безпеки	35
Рекомендована література	36

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛІЗУ РОЗМІРНОСТЕЙ ДЛЯ

ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ

1.1 Мета роботи

Вивчити основи методу аналізу розмірностей, який використовується під час фізичного моделювання систем. Оволодіти методом для вирішення практичних завдань, визначити його переваги і недоліки.

1.2 Загальні відомості

Фізичне моделювання (ФМ) є дослідженням фізично подібних процесів на установках, що дозволяють зберегти фізичну природу явищ, але відтворюють їх в інших масштабах. Такі дослідження набули широкого поширення в триботехніці.

Особливістю моделі при ФМ є її однакова природа з натурним об'єктом-оригіналом. Для моделі і оригіналу застосовуються ідентичні матеріали трибосистеми. Модель і натура в цьому випадку обов'язково пов'язані залежністю у вигляді розрахункового масштабного чинника, який є сукупністю усіх масштабних коефіцієнтів переходу від моделі до натури для параметрів режиму роботи, конструкції і матеріалів трибоспряження.

ФМ може реалізовуватися на натурних об'єктах (натурне моделювання), або на моделях, які виконано в іншому масштабі, що дозволяє заощадити час, енергію, матеріали, сировину і т.і. ФМ дає можливість створювати на моделі такі режими випробувань, при яких вихідні характеристики моделі і оригіналу будуть тотожними. В результаті можна отримати на моделі фрикційні характеристики, аналогічні характеристикам натурних об'єктів.

При ФМ зустрічаються три підходи, що є типовими для вирішення інженерних завдань.

Перший (менш перспективний, але такий, що легко реалізовується) – виявлення зв'язку між вихідними характеристиками трибосистеми і будь-якій узагальненій змінній.

Другий (перспективніший) розглядає трибоспрямлення як систему і вимагає отримання замкнутого математичного опису цієї системи. Математичний опис заснований на рівняннях математичної фізики. Проте, часто не є можливим математично описати процеси, що протікають в трибосистемі.

Третій (найбільш перспективний) дозволяє при спільному використанні аналізу розмірності і теорії подібності отримати коректний математичний опис процесів в трибосистемах.

Будь-яке рівняння, відбиваючи фізичну суть явища, що вивчається, повинне мати однакову розмірність як в лівій, так і в правій частині. Це правило іноді допомагає переконатися в правильності написання рівняння.

Одиниці виміру кожної фізичної величини виражаються через основні одиниці виміру, вибір яких є достатньою мірою умовним. Формула, що виражає одиницю виміру цієї величини через основні одиниці виміру, носить назву розмірності цієї величини.

Для позначення розмірності якої-небудь фізичної величини, наприклад сили F , користуються символом $[F]$. Таким чином, розмірність довжини позначається $[l]=L$, часу – $[t]=T$, маси – $[m]=M$ і т.д.

При описі механічного руху (кінематики) вистачає двох основних одиниць – довжини (L) і часу (T). Опис динамічних явищ вимагає додаткової основної величини – маси (M). При описі процесів тертя і зношування для урахування температури елементів трибосистеми необхідно використовувати ще і температуру (Θ), а при вивченні електрифікованих контактів – силу струму (I). Таким чином, кількість основних одиниць в задачах триботехніки коливається від двох до п'яти.

Сукупність основних одиниць виміру утворює систему одиниць. Наприклад, в завданнях кінематики використовується система (L, T), механіки – (M, L, T) і т.д. У будь-якій системі одиниць виміру будь-яка похідна (вторинна) величина може бути виражена як степенева залежність від основних величин. Наприклад, в системі MLT похідна фізична величина виражається як:

$$[Q] = M^{\alpha} L^{\beta} T^{\gamma}.$$

Доказ цього твердження [1] опускаємо.

Слід зауважити, що формули розмірності однієї і тієї ж фізичної величини можуть бути різними при переході від однієї системи одиниць до іншої.

Перехід від однієї системи одиниць до іншої. Чи можна вибрати як основні одиниці виміру які-небудь інші (у загальному випадку u_1, u_2, u_3) окрім M, L, T ? Можна при дотриманні таких умов:

1) розмірності u_1, u_2, u_3 є незалежними функціями M, L, T , тобто $u_1 \neq u_2^{\alpha} u_3^{\beta}$ при будь-яких α і β ;

2) можливе однозначне зворотне перетворення, тобто величини M, L, T єдиним чином можна виразити через u_1, u_2, u_3 .

Припустимо, $u_1 = M^{\mu_1} L^{\lambda_1} T^{\tau_1}$, $u_2 = M^{\mu_2} L^{\lambda_2} T^{\tau_2}$, $u_3 = M^{\mu_3} L^{\lambda_3} T^{\tau_3}$.

Тоді достатньою умовою виконання вимог 1 і 2 буде:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \mu_1 & \lambda_1 & \tau_1 \\ \mu_2 & \lambda_2 & \tau_2 \\ \mu_3 & \lambda_3 & \tau_3 \end{vmatrix} \neq 0.$$

Кількість основних одиниць виміру є довільною. Проте, системи з двома основними одиницями, наприклад LT , не набули поширення внаслідок незручності в практичному використанні.

Евристичний аспект розмірності. Якщо при вирішенні задачі перевірка показала, що розмірність лівої і правої частин рівняння різні, значить, в рішенні є помилки. Розмірність допомагає не лише знаходити помилки, але і отримувати нові результати. За допомогою методу розмірності можна скласти опис практично будь-якої складної неоднорідної моделі [2].

Рішення завдань методом розмірності завжди починають із складання списку параметрів, що характеризують досліджуваний процес. Потім складають рівняння залежності цільової функції від параметрів процесу в загальному вигляді. Записуючи цей же вираз через розмірність, і вирішуючи систему рівнянь для показників мір при розмірності, знаходять остаточну формулу для досліджуваної моделі з точністю до постійного коефіцієнта.

Наведемо елементарний приклад. Необхідно знайти залежність часу падіння тіла із заданої висоти без початкової швидкості. Ясно, що цей час може залежати тільки від висоти H і прискорення вільного падіння g . Тоді в загальному вигляді залежність часу падіння із заданої висоти має вигляд:

$$T = A \cdot H^\alpha \cdot g^\beta.$$

Запишемо той же вираз через розмірність з урахуванням того, що розмірність лівої і правої частин рівняння рівні:

$$c^1 = m^\alpha \cdot \left(\frac{m}{c^2}\right)^\beta = m^{\alpha+\beta} \cdot c^{-2\beta}.$$

Тепер складемо і вирішимо систему рівнянь для показників мір з урахуванням того, що в лівій частині ступінь при розмірності довжини (метри) дорівнює нулю:

$$\begin{cases} \alpha + \beta = 0 \\ -2\beta = 1 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \beta = -\frac{1}{2} \\ \alpha = \frac{1}{2} \end{cases}.$$

Тоді:

$$T = A \sqrt{\frac{H}{g}}.$$

Звичайно, це рівняння не дозволяє знайти точне рішення, але дає можливість уявити вигляд залежності. Невідомий коефіцієнт можна визначити експериментально. Але якщо вимагається порівняти два значення функції при різних значеннях H , результат буде абсолютно точний.

1.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Які особливості притаманні фізичному моделюванню?
2. Що таке основні одиниці виміру?
3. Як застосувати аналіз розмірності для фізичного моделювання?

1.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

Варіанти завдань для переходу від однієї системи одиниць виміру до іншої (видаються викладачем).

Варіанти похідних величин, розмірність яких необхідно виразити в заданій системі одиниць (видаються викладачем).

Варіанти фізичних завдань для моделювання методом розмірності (видаються викладачем).

Довідкова література.

1.5 Порядок проведення лабораторної роботи

1. Для різних варіантів основних одиниць виміру, які задає викладач, визначити можливість використання цих систем одиниць.

2. Для різних варіантів похідних величин, які задає викладач, виразити їх розмірність в певній системі одиниць.

3. Для різних варіантів фізичних завдань знайти вигляд залежності цільової функції від параметрів процесу з точністю до постійного коефіцієнту.

1.6 Зміст звіту

Звіт повинен містити результати розрахунків за пунктами порядку проведення лабораторної роботи.

1.7 Рекомендована література

[1-3].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ

2.1 Мета роботи

Набути навичок застосування методів теорії подібності для фізичного моделювання систем.

2.2 Загальні відомості

Теорія подібності має велике значення при моделюванні різних явищ.

Моделювання є заміна вивчення явища в натурі вивченням аналогічного явища більшого або меншого масштабу зазвичай в спеціальних лабораторних умовах [4]. Основний сенс моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів з моделями можна було передбачати характер ефектів і різні величини, що характеризують явище в натурних умовах.

Фізичне моделювання засновано на розгляді фізично подібних явищ. Фізичну подібність можна розглядати як узагальнення геометричної подібності. Дві геометричні фігури подібні, якщо відношення усіх відповідних розмірів однакові. Якщо відомим є коефіцієнт подібності – масштаб, то простим множенням розміру однієї геометричної фігури на величину масштабу можна отримати відповідний розмір іншій подібної фігури. Далі подано визначення фізичної подібності в загальному вигляді.

Припустимо, що для опису явищ, що вивчаються, вживаються r основних незалежних одиниць виміру $A_1, A_2, \dots, A_r$ (наприклад, маса-довжина-час MLT). Похідні одиниці виміру мають вигляд: $Q = A_1^{p_1} A_2^{p_2} \dots A_r^{p_r}$. Їх розмірність $[Q] = [A_1^{p_1} A_2^{p_2} \dots A_r^{p_r}]$ характеризується числовими показниками $p_1, p_2, \dots, p_r$.

Припустимо, що вивчається клас явищ S , кожне з яких визначається певними значеннями системи величин $\{Y_\alpha\}$. Два такі явища $S^{(1)}$ і $S^{(2)}$ називаються подібними, якщо значення величин Y_α^2 , що характеризують явище $S^{(2)}$, можна одержати зі значень відповідних величин Y_α^1 , що характеризують явище $S^{(1)}$, за формулами:

$$Y_\alpha^2 = k_1^{p_1} k_2^{p_2} \dots k_r^{p_r} Y_\alpha^1,$$

де коефіцієнти подібності $k_1, k_2, \dots, k_r$ є постійними, а показники $p_1, p_2, \dots, p_r$ визначаються розмірністю:

$$[Y_\alpha] = [A_1^{p_1} A_2^{p_2} \dots A_r^{p_r}]$$

величин Y_α .

Припустимо, що з системи величин $\{Y_\alpha\}$ виділено деяка частина, що утворює систему $\{X_\beta\}$ *визначальних параметрів*, так що числове значення y_α будь-якої величини Y_α є функцією $Y_\alpha = f_\alpha\{x_\beta\}$ числових значень $\{x_\beta\}$, і вигляд функціональних залежностей f_α залишається незмінним при будь-якому виборі основних одиниць виміру $A_1, A_2, \dots, A_r$. У цьому припущенні основний принцип теорії подібності може бути сформульований таким чином.

Для подібності явищ $S^{(1)}$ і $S^{(2)}$ необхідно і достатньо, щоб значення будь-якої безрозмірної комбінації

$$k = X_{\beta_1}^{q_1} X_{\beta_2}^{q_2} \dots X_{\beta_m}^{q_m} \quad (2.1)$$

визначальних параметрів в явищах $S^{(1)}$ і $S^{(2)}$ були рівні: $k^1 = k^2$.

Кожен безрозмірний вираз k виду (1) є критерієм подібності.

Очевидно, що при такому визначенні критеріїв подібності в їх коло потрапляють усі безрозмірні визначальні параметри і усі відношення вигляду

$$k = \frac{X_{\beta_1}}{X_{\beta_2}}, \quad (2.2)$$

де X_{β_1} і X_{β_2} – визначальні параметри однієї і тієї ж розмірності.

Відношення вигляду (2.2) називають тривіальними. Ці відношення при перерахуванні критеріїв подібності часто не враховують. Корисними є нетривіальні умови подібності вигляду $k^1 = k^2$.

Доведено [4], що кількість незалежних нетривіальних критеріїв подібності вигляду (2.1), які можна скласти з величин системи $\{X_\beta\}$, складає $s = n - r^1$, де n – число різних розмірностей величин системи $\{X_\beta\}$, а r^1 – число *основних незалежних одиниць виміру* серед цих n розмірностей. Оскільки завжди $r \leq r^1$, то $s \leq n - r$.

Таким чином, для збереження подібності при моделюванні необхідно дотримуватись вимоги постійності критеріїв подібності виду (2.1). Проте на практиці часто ця умова не виконується, і тоді виникають погрішності («масштабний ефект»), який виникає при перенесенні на натуру результатів, що отримано на моделі.

Будь-яке фізичне співвідношення між розмірними величинами системи $\{X_\beta\}$ може бути подано як співвідношення між безрозмірними величинами (2.1). Це твердження відоме як π -теорема [5, 6], у якій і полягає джерело корисного використання методу теорії розмірності до моделювання в триботехніці.

Що менше число параметрів, які що визначають величину, що вивчається, то більше обмежено функціональну залежність і простіше вести дослідження. Зокрема, якщо число *основних незалежних одиниць виміру* дорівнює числу різних розмірностей величин системи $\{X_\beta\}$, то за допомогою теорії розмірності ця залежність однозначно визначається з точністю до постійного коефіцієнту (див. лабораторну роботу №1).

Будь-яке моделювання починається з схематизації, виділення основних чинників, які визначають величини, що цікавлять нас, і з якісної побудови моделі явища за допомогою найпростіших образів, вже відомих з досвіду. Правильна схематизація дуже часто є важким завданням, що вимагає від дослідника великого досвіду, інтуїції і попереднього якісного визначення механізму процесів, що вивчаються.

При перерахуванні параметрів, які визначають трибосистему, що вивчається, необхідно вказувати усі розмірні параметри, пов'язані з сутністю явища, незалежно від того, чи є ці параметри постійними або змінними. Важливо, що розмірні параметри можуть набувати

різних значень в різних системах одиниць виміру.

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Що таке критерії подібності?
2. Які умови необхідно виконати, щоб натурна і модельна системи були подібні?
3. Що таке тривіальні критерії подібності?
4. Як визначити максимально можливу кількість нетривіальних критеріїв подібності?

2.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Варіанти завдань для фізичного моделювання процесів тертя і зношування.
2. Довідкова література.
3. ПК, офісні програми.

2.5 Порядок проведення лабораторної роботи

1. Для заданого натурального фізичного процесу визначити основні незалежні одиниці виміру і систему визначальних параметрів.
2. Знайти критерії подібності, запропонувати масштаб модельного процесу.
3. Розрахувати масштабні коефіцієнти для перерахунку визначальних параметрів з натури на модель.

2.6 Зміст звіту

Звіт повинен містити результати роботи, виконаної згідно пунктів підрозділу 2.5.

2.7 Рекомендована література

[4-6].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ПОШУК ОПТИМУМУ МЕТОДАМИ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

*Якщо досягнуто межу, тоді все зрозуміло.
Якщо межу не досягнуто, тоді чи досягнуто мету?*

3.1 Мета роботи

Засвоїти практичні навички пошуку оптимуму методами планування експерименту.

3.2 Загальні відомості

Одним з методів планування експерименту є метод Бокса-Уілсона. Цей метод є, ймовірно, найпростішим. Однак його успішне застосування залежить від вирішення багатьох питань, що пов'язані з прийняттям неформалізованих рішень під час вибору параметрів оптимізації, факторів, плану експериментів та інтерпретації результатів.

Думка про те, що експеримент можна планувати, сходить до глибокої старовини. Наш далекий предок, який переконався, що гострим каменем можна вбити навіть мамонта, поза сумнівом, висував гіпотези, які після цілеспрямованої експериментальної перевірки привели до створення списа, дротика, а потім і лука із стрілами. Він, проте, не користувався статистичними методами, тому залишається незрозумілим, як він взагалі вижив і тим самим забезпечив наше існування.

Тільки на початку XX століття було розроблено статистичні методи планування експерименту. Честь відкриття цієї ідеї належить Рональду Фішеру, який уперше показав доцільність одночасного

варіювання усіма чинниками на противагу широко поширеному однофакторному експерименту.

Застосування планування експерименту робить поведінку експериментатора цілеспрямованою і організованою, значно підвищує надійність отриманих результатів. Важливою перевагою методу є його універсальність і придатність у величезній більшості галузей дослідження.

Планування експерименту – це процедура вибору умов проведення і кількості дослідів, які є необхідними і достатніми для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю. При цьому важливим є таке: мінімізація загального числа дослідів; одночасне варіювання за спеціальними правилами усіма змінними, що визначають процес; використання математичного апарату, що формалізує багато дій експериментатора; вибір чіткої стратегії, яка дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожної серії експериментів.

Пошук оптимальних умов є одним з найбільш поширених дослідницьких завдань. Це завдання виникає, коли встановлено можливість проведення процесу і необхідно знайти найкращі умови його реалізації. Слід зазначити, що завжди необхідно чітко формулювати, в якому сенсі умови мають бути оптимальними. Точне формулювання мети значною мірою визначає успіх дослідження.

Тут необхідно визначити поняття «Об'єкт дослідження». Для опису об'єкту дослідження зручно користуватися уявленням про кібернетичну систему (рис. 3.1). Іноді таку систему називають «чорним ящиком» [7].



Рисунок 3.1 – Схема «Чорного ящика»

Стрілки справа зображують чисельні характеристики цілей дослідження. Назвемо їх параметрами оптимізації. У літературі можна зустріти інші терміни: критерій оптимізації, цільова функція, вихід «чорного ящика» і т.д.

Для проведення експерименту необхідно мати можливість впливати на поведінку «чорного ящика». Способи цього впливу називаються чинниками, вони є позначеними стрілками справа. Їх називають також входами «чорного ящика».

Для вирішення завдань оптимізації використовуються математичні моделі об'єкту дослідження, тобто рівняння, що зв'язують параметр оптимізації з чинниками:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Це рівняння називають «функцією відгуку».

Кожен чинник може набувати в досліді одне або декілька значень. Такі значення називають рівнями. Навіть якщо чинник здатний приймати безперервний ряд значень, точність його визначення на практиці обмежено. Тому логічно вважати, що кожен чинник має певне число дискретних рівнів. Ця обставина значно спрощує побудову чорного ящика і проведення експерименту.

Фіксований набір рівня чинників (тобто встановлення кожного чинника на деякий рівень) визначає один з можливих станів «чорного ящика». Одночасно це є умовами проведення одного з можливих дослідів. Сукупність усіх можливих наборів рівнів чинників визначає повну множину станів «чорного ящика», тобто числа різних дослідів:

$$N = p^k, \tag{3.1}$$

де N – число комбінацій (дослідів);

p – число рівнів;

k – число чинників.

Реальні об'єкти мають величезну складність. Наприклад, відносно проста система з п'ятьма чинниками на п'яти рівнях має 3125 станів, а для десяти чинників на чотирьох рівнях їх вже більше мільйона. У таких умовах ми просто вимушені відмовитися від таких експериментів, які включають усі можливі дослідів, - перебір занадто великий. Тоді виникає питання: скільки і яких дослідів треба

включити в експеримент, щоб вирішити поставлене завдання? Тут-то і приходить на допомогу планування експерименту.

При плануванні експерименту об'єкт дослідження має бути відтворним і керованим. Відтворюваність означає можливість повторного отримання одного і того ж значення параметра оптимізації на об'єкті дослідження (в межах допустимої погрішності досліду) кожного разу при проведенні досліду з постійними значеннями чинників через нерівні проміжки часу. Керованість - можливість проведення на об'єкті активного експерименту, тобто можливість змінювати чинники і тим самим впливати на стан об'єкту, тобто на параметр оптимізації.

На практиці немає абсолютно керованих об'єктів. На реальний об'єкт зазвичай діють як керовані, так і некеровані чинники. Некеровані чинники впливають на відтворюваність експерименту і є причиною її порушення. Якщо вимоги до відтворюваності не виконуються, то проведення активного експерименту є неможливим.

У загальному вигляді цикл робіт по знаходженню оптимуму для деякого об'єкту дослідження методами планування експерименту включає такі види робіт:

- вибір чинників і параметра оптимізації. Якщо необхідно враховувати комплекс параметрів, то будують узагальнений параметр оптимізації;
- перевірка чинників на незалежність, завдання області визначення чинників, завдання основного рівня і інтервалу варіювання для кожного чинника;
- побудова плану для повного факторного експерименту або вибір дробової репліки для зменшення кількості дослідів;
- проведення експерименту з урахуванням рандомізації;
- статистична обробка результатів експерименту: розрахунок коефіцієнтів моделі, дисперсії відтворюваності, дисперсії адекватності, перевірка моделі на адекватність і перевірка значущості коефіцієнтів;
- круте сходження;
- перехід до плану другого порядку, якщо досягнута область, близька до екстремуму.

Розглянемо ці дії детальніше.

Параметр оптимізації.

Мета дослідження має бути сформульована чітко і допускати кількісну оцінку. Вибір того аспекту об'єкту дослідження, який є найбільш цікавим, якраз і задається метою дослідження.

Параметр оптимізації – це реакція (відгук) на дію чинників, які визначають поведінку системи (див. рис. 3.1), що вивчається. Вимоги до параметра оптимізації такі:

- ефективність з точки зору досягнення мети;
- універсальність;
- можливість кількісної оцінки одним числом;
- статистична ефективність;
- повинен мати фізичний сенс;
- повинен існувати для усіх станів системи.

З багатьох параметрів, що характеризують об'єкт дослідження, тільки один може служити параметром оптимізації. Інші розглядаються як обмеження. Якщо з багатьох відгуків, що характеризують об'єкт, важко вибрати один найважливіший, тоді множину відгуків деяким способом узагальнюють в єдину кількісну ознаку - узагальнений параметр оптимізації.

Узагальнений параметр оптимізації.

Побудова узагальненого параметра оптимізації пов'язана із створенням єдиної ознаки, кількісно визначального функціонування досліджуваного об'єкту з багатьма вихідними параметрами. Щоб об'єднати різні за природою і розмірністю вихідні параметри в єдину величину необхідно:

- вибрати єдину безрозмірну шкалу, в одиницях якої можна виражати величини кожного з вихідних параметрів;
- вибрати правило комбінування приватних вихідних параметрів в узагальнений параметр. Тут не існує єдиного способу, і вибір не формалізований. Можливі варіанти включають використання критеріїв подібності, як безрозмірних комплексів розмірних величин (див. лаб. раб. №2), або узагальненої функції бажаності Харрінгтона:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n d_u},$$

де d_u – значення окремого вихідного параметра.

Чинники.

Після того, як обрано об'єкт дослідження і параметр оптимізації, треба включити в розгляд усі суттєві чинники, які можуть впливати на процес. Якщо який-небудь суттєвий чинник виявиться неврахованим, то це може привести до неприємних наслідків.

З іншого боку, кількість чинників визначає кількість різних станів об'єкту (3.1). Тому якщо чинників більше п'ятнадцяти, треба звернутися до методів відсіювання несуттєвих чинників.

Від вдалого вибору чинників залежить успіх оптимізації.

До чинників пред'являються вимоги керованості і однозначності.

Керованість – можливість встановити потрібне значення чинника і підтримувати його на постійному рівні.

Однозначність – чинники повинні безпосередньо впливати на об'єкт дослідження.

Вимоги до сукупності чинників: сумісність і відсутність лінійної кореляції.

Сумісність означає, що усі комбінації чинників є здійсними і безпечними.

Відсутність лінійної кореляції означає відсутність лінійного зв'язку між сукупністю чинників.

Точність фіксації чинників на заданому рівні має бути висока. Необхідна міра точності визначається діапазоном зміни чинників.

Вибір моделі.

Будь-яку залежність можна подати у вигляді полінома. Але поліноми бувають різних ступенів. Яку ступінь узяти на першому кроці?

Експеримент потрібний тільки для того, щоб знайти чисельні значення коефіцієнтів полінома. Чим вище ступінь полінома, тим більше коефіцієнтів і тим більше експериментів буде потрібно.

З іншого боку, будь-яка функція може бути апроксимована лінійною залежністю на досить вузькому інтервалі варіювання чинників. Отже, в принципі можливий такий вибір області, при якому лінійна модель виявиться адекватною. Тому як модель приймають поліном першого ступеня при умові, що чинники змінюються в деякій відносно вузькій області, званої інтервалом варіювання чинників.

Наприклад, для випадку трьох чинників поліном першого ступеня такий:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3.$$

Після побудови адекватної лінійної моделі в одній підобласті можна визначити градієнт, тобто напрям найшвидшого зростання функції відгуку (параметра оптимізації). У цьому напрямі проводять серію експериментів, яка у кращому випадку дозволяє знайти глобальний оптимум. Якщо глобальний оптимум не знайдений, то проводять нову серію експериментів в новій підобласті, яка вже визначена на попередньому етапі досліджень. Для цієї підобласті також будується лінійна модель, визначається новий градієнт і так далі. Цикл повторюється до тих пір, поки рух по градієнту не перестане давати ефект. Це означає, що ми потрапили в область, близьку до оптимуму. Така область називається «Майже стаціонарною».

Повний факторний експеримент.

На підставі аналізу апріорної інформації вибирають область факторного простору, в якій проводиться оптимізація, тобто діапазон змін кожного з чинників. Потім усередині цієї області вибирають локальну підобласть для планування експерименту. Процедура вибору цієї підобласті включає два етапи: вибір основного рівня і вибір інтервалів варіювання (рис. 3.2).

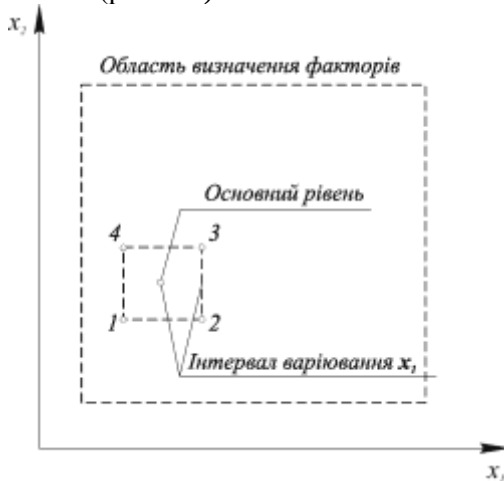


Рисунок 3.2 – Схема області визначення чинників, основного рівня і інтервалів варіювання для двох чинників

Вибір основного рівня проводиться таким чином. На підставі апріорної інформації знаходять певну комбінацію чинників, яка дає найкраще значення параметра оптимізації. Ця комбінація дає точку в багатовимірному факторному просторі, яка розглядається як початкова для побудови плану експерименту і називається основним (нульовим) рівнем (див. рис. 3.2). Потім вибирають інтервали варіювання чинників. Чим менше передбачувана кривизна поверхні відгуку, тим ширше інтервали варіювання по кожному з чинників.

Побудова плану експерименту зводиться до вибору експериментальних точок, що є симетричними відносно нульового рівня і знаходяться від нього на відстані, який дорівнює інтервалу варіювання (див. рис. 3.2, точки 1, 2, 3, 4). Таким чином, кожен чинник варіюється на двох рівнях.

Відповідно можна визначити кількість дослідів для перебору усіх можливих станів об'єкту при відомій кількості чинників (таблиця 3.1). Експеримент, в якому реалізуються усі можливі поєднання рівнів чинників, називають повним факторним експериментом.

Таблиця 3.1 – Кількість дослідів в повному факторному експерименті типу 2^k

Кількість чинників, k	Кількість дослідів, $N=2^k$
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096
13	8192
14	16384
15	32768

Якщо число чинників дорівнює двом, то маємо повний факторний експеримент типу 2^k .

Побудова плану.

У плануванні експерименту використовуються кодовані значення чинників : $+1$ і -1 . Для простоти запису одиниці часто опускають. Кодування чинників є зручним, оскільки кожен чинник має свою розмірність і свій інтервал варіювання. Проте загальним для усіх чинників є те, що вони варіюються симетрично відносно нульового рівня. Таким чином, для кожного чинника окрім дійсного масштабу використовують кодований, в якому меншому значенню (нижньому рівню) відповідає -1 , а більшому (верхньому рівню) $+1$.

Припустимо, що один з чинників є зміст вуглецю в сплаві; за нульовий рівень прийнято значення 1,2%; інтервал варіювання 0,2%. Тоді кодованому значенню -1 відповідає вміст вуглецю 1,0% (нижній рівень), а кодованому значенню $+1$ відповідає вміст вуглецю 1,4% (верхній рівень).

Усі поєднання рівнів в експерименті з двома чинниками зручно записати у вигляді таблиці, де рядки відповідають різним дослідом, а стовпці - значенням чинників (таблиця. 3.2). Такі таблиці називають матрицями планування експерименту.

Таблиця 3.2 – Матриця повного факторного експерименту типу 2^2

Номер дослід	x_1	x_2	y
1	-	-	y_1
2	+	-	y_2
3	-	+	y_3
4	+	+	y_4

Кожен стовпець в матриці планування називають вектор-стовпцом, а кожен рядок – вектор-рядком. Таким чином, таблиця. 2 містить два вектор-стовбця незалежних змінних і один вектор-стовпець параметра оптимізації. Досліди 1, 2, 3, 4 матриці планування таблиці 3.2 відповідають точкам 1, 2, 3, 4 факторні простори на рисунку 3.2.

Якщо для двох чинників усі можливі комбінації рівнів легко знайти прямим перебором, то із зростанням числа чинників виникає

необхідність в деякому прийомі побудови матриць. Розглянемо один з прийомів побудови матриць більшої розмірності.

При додаванні нового чинника кількість дослідів нового плану порівняно з початковим збільшується удвічі (див. табл. 3.1). При цьому кожна комбінація рівнів початкового плану зустрічається двічі: у поєднанні з нижнім і верхнім рівнем нового чинника (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Матриця повного факторного експерименту типу 2^3

Номер дослідів	x^1	x^2	x^3	y
1	-	-	+	y^1
2	+	-	+	y^2
3	-	+	+	y^3
4	+	+	+	y^4
5	-	-	-	y^5
6	+	-	-	y^6
7	-	+	-	y^7
8	+	+	-	y^8

Незалежно від числа чинників матриці повного факторного експерименту володіють такими властивостями.

Симетричність відносно центру експерименту. Алгебраїчна сума елементів вектор-стовпця кожного чинника дорівнює нулю (перевірте).

Ортогональність. Сума почленних добутоків будь-кого двох вектор-стовпців матриці дорівнює нулю (перевірте).

Ротатабельність. Точки в матриці планування підібрано так, що точність завбачення значення параметра оптимізації однакова на рівних відстанях від центру експерименту і не залежить від напрямку.

Знаходження коефіцієнтів моделі.

За результатами експериментів знаходять значення невідомих коефіцієнтів моделі:

$$b_j = \frac{\sum_{i=0}^N x_{ij}y_i}{N}, j=0, 1, \dots k. \quad (3.2)$$

Завдяки кодуванню чинників розрахунок коефіцієнтів перетворюється на просту арифметичну процедуру.

Для розрахунку коефіцієнта b_0 необхідно скласти усі значення y_i і розділити на число дослідів. Щоб привести цю процедуру у відповідність із загальною формулою для обчислення коефіцієнтів (3.2) в матрицю планування зручно ввести вектор-стовпець фіктивної змінної x_0 , яка в усіх дослідях набуває значення +1. Це вже враховано в записі формули (3.2), де j набуває значень від 0 до k .

Коефіцієнти при незалежних змінних вказують на силу впливу чинників. Чим більше чисельна величина коефіцієнта, тим більший вплив робить чинник.

Як вже відмічено, на першому етапі планування експерименту прагнуть отримати лінійну модель. Проте немає гарантії, що на обраних інтервалах варіювання процес описується лінійною моделлю. Чи можна кількісно оцінити нелінійність, користуючись повним факторним експериментом?

Один з видів нелінійності, що часто зустрічаються, пов'язаний з тим, що ефект одного чинника залежить від рівня, на якому знаходиться інший чинник. В цьому випадку говорять, що має місце ефект взаємодії двох чинників. Повний факторний експеримент дозволяє кількісно оцінювати ефекти взаємодії. Для цього потрібно, користуючись правилом перемножування стовпців отримати стовпець добутку двох чинників (таблиця 3.4).

Важливо, що при додаванні стовпців ефектів взаємодій усі розглянуті властивості матриць планування зберігаються.

З урахуванням взаємодії чинників рівняння регресії для трьох чинників приймає вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

Коефіцієнти при ефектах взаємодії обчислюють згідно (3.2), користуючись відповідним вектор-стовпцем для цієї взаємодії.

Таблиця 3.4 – Матриця повного факторного експерименту типу 2^3 з урахуванням взаємодії чинників

Номер досліджу	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	-	-	+	+	-	-	+	y_1
2	+	-	+	-	-	-	-	y_2
3	-	+	+	-	+	+	-	y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	y_4
5	-	-	-	+	+	+	-	y_5
6	+	-	-	-	+	+	+	y_6
7	-	+	-	-	-	-	+	y_7
8	+	+	-	+	-	-	-	y_8

Ефект взаємодії двох чинників називають парним ефектом або ефектом взаємодії *першого* порядку. Ефект взаємодії трьох чинників називають потрійним ефектом або ефектом взаємодії *другого* порядку. Кількість усіх можливих ефектів, включаючи b_0 , лінійні ефекти і взаємодії усіх порядків, дорівнює кількості дослідів повного факторного експерименту. Кількість можливих взаємодій деякого порядку можна визначити по формулі числа поєднань :

$$C_k^m = \frac{k!}{m!(k-m)!},$$

де k – число чинників,

m – число елементів у взаємодії.

Так, для плану 2^4 число парних взаємодій дорівнює шести.

Окрім ефектів взаємодії суттєвими можуть виявитися коефіцієнти при квадратах чинників, їх кубах і так далі. Для випадку суттєвих квадратичних членів в двохфакторному експерименті модель виглядає так:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2.$$

Чи можна витягнути інформацію про квадратичні члени з повного факторного експерименту? Спроба побудови вектор-стовпців для x_1^2 і x_2^2 призводить до отримання одиничних стовпців, які співпадають один з одним і із стовпцем x_0 . Оскільки ці стовпці нерозрізненні, то не можна сказати, за рахунок чого виходить величина b_0 . Вона включає значення вільного члена і вклади квадратичних членів. В цьому випадку говорять, що має місце змішана оцінка.

Як бачимо, навіть при проведенні повного факторного експерименту ми вимушені миритися з присутністю змішаних оцінок коефіцієнтів. Якщо так, чи можна використовувати змішування для зменшення кількості дослідів при великій кількості чинників, коли провести повний факторний експеримент важко або взагалі неможливо (див. табл. 3.1)?

Побудова дробових реплік.

Змішування ефектів взаємодії дозволяє проводити дробові факторні експерименти. Кожен "крок" скорочення плану експерименту зменшує кількість дослідів удвічі за рахунок змішування ефектів взаємодії один з одним і (або) з лінійними ефектами.

Наприклад, для повного факторного експерименту 2^3 кількість дослідів складає 8, а для напіврепліки 2^{3-1} тільки 4. У планах вищих порядків застосовують репліки більшої дробності, що дозволяє на декілька порядків скорочувати кількість дослідів (табл. 3.5).

Вибір дробових реплік заснований на змішуванні лінійних ефектів з ефектами взаємодії чинників. Ефективність репліки залежить від системи змішування. Репліки, у яких лінійні ефекти змішані з взаємодіями найвищого порядку, є найбільш ефективними, оскільки мають найбільшу роздільну здатність. Детальніше про вибір дробових реплік см [7].

Проведення експерименту.

Для кожного набору рівнів чинників проводять декілька ідентичних дослідів. Кількість дослідів в кожному випадку визначається виходячи з обставин експерименту. Збільшення кількості

дослідів зменшує дисперсію і середньоквадратичне відхилення, але пов'язано з додатковими витратами часу і коштів.

Таблиця 3.5 – Порівняння кількості дослідів в повному факторному експерименті і факторних експериментах різної дрібності

Число чинників	Дробова репліка	Умове позначення	Число дослідів	
			для дробової репліки	для повного факторного експерименту
3	1/2 репліка від 23	2^{3-1}	4	8
4	1/2 репліка від 24	2^{4-1}	8	16
5	1/4 репліка від 25	2^{5-2}	8	32
6	1/8 репліка від 26	2^{6-3}	8	64
7	1/16 репліка від 27	2^{7-4}	8	128
5	1/2-репліка від 25	2^{5-1}	16	32
6	1/4-репліка від 26	2^{6-2}	16	64
7	1/8-репліка від 27	2^{7-3}	16	128
8	1/16-репліка від 28	2^{8-4}	16	256
9	1/32-репліка від 29	2^{9-5}	16	512
10	1/64-репліка від 210	2^{10-6}	16	1024
11	1/128-репліка від 211	2^{11-7}	16	2048
12	1/256-репліка від 212	2^{12-8}	16	4096
13	1/512-репліка від 213	2^{13-9}	16	8192
14	1/1024-репліка від 214	2^{14-10}	16	16384
15	1/2048-репліка від 215	2^{15-11}	16	32768

До проведення експериментів треба ретельно готуватися, що сприяє зменшенню помилок досліду. Сумарна помилка досвіду складається з помилок виміру чинників і параметра оптимізації і помилок при проведенні досліду.

Помилки підрозділяються на випадкові і систематичні. Щоб компенсувати систематичні помилки досліди слід рандомізувати в часі.

Результати спостережень, що містять грубі помилки, виключають за відомою методикою [7 та ін.].

Як вказано вище, при певної сукупності значень чинників проводять декілька ідентичних дослідів, за результатами яких розраховують дисперсію:

$$S^2 = \frac{\sum_1^n (y_q - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (3.3)$$

де y_q – значення параметра оптимізації в кожному паралельному досвіді;

n – кількість повторних дослідів.

Дисперсії серії дослідів на різних рівнях чинників мають бути однорідні. Перевірка однорідності дисперсій проводиться за допомогою різних статистичних критеріїв, простішим з яких є критерій Фішера (F – критерій). Цей критерій є відношенням більшої дисперсії до меншої. Отримана величина порівнюється з табличною. Якщо отримане відношення більше табличного, то дисперсії значущо відрізняються і, отже, є неоднорідними. Так, щоб упевнитися у відтворюваності усіх дисперсій дослідів для кожного з рівнів чинників, досить порівняти мінімальну і максимальну дисперсії. Якщо різниця між ними незначуща, то різниця між усіма іншими дисперсіями незначуща тим більше і, отже, усі дисперсії однорідні. Однорідність дисперсій дуже важлива, оскільки лежить в основі наступного регресійного аналізу.

Сума дисперсій параметра оптимізації для кожного з рівнів чинників (3.3), ділена на кількість рівнів N (тобто кількість рядків в матриці планування), дає величину дисперсії відтворюваності $S_{\{y\}}^2$:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_1^N S_i^2}{N}. \quad (3.4)$$

Якщо в результаті експерименту при різному поєднанні чинників набуто близьких значень параметра оптимізації слід перевірити значущість їх відмінності. Перевірку проводять шляхом порівняння різниці між значеннями параметра оптимізації з помилкою досліду. При дуже великій помилці досліду різниця між значеннями параметра оптимізації може виявитися незначущою. І навпаки,

помилка може мати таку малу величину, що різниця в 2% для значень параметра оптимізації виявиться значущою.

Якщо відома помилка досліду, то значущість відмінностей двох значень параметра оптимізації можна перевірити за допомогою t – критерію за формулою:

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}},$$

де s – середньквдратичне відхилення дослідів,

n_1 – кількість спостережень в першому досліді,

n_2 – кількість спостережень в другому досліді.

Ця формула призначена для порівняння середніх значень двох малих вибірок з рівними дисперсіями. Значення t - критерію знаходять з таблиць. Число ступенів свободи складає $n_1 + n_2 - 2$.

Розрахунок коефіцієнтів моделі.

Для обчислення коефіцієнтів моделі використовують метод найменших квадратів. Оскільки матриця планування є ортогональною, обчислення істотно спрощуються, і будь-який коефіцієнт, включаючи b_0 , розраховується за простою формулою:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ij}}{N},$$

де $j = 0, 1, 2 \dots k$ – номер чинника.

Оскільки кожен чинник окрім x_0 варіюється на двох рівнях $+1$ і -1 , то обчислення зводяться до приписування стовпцю y знаків з відповідного стовпця чинників і алгебраїчному складанню набутих значень. Ділення результату на число рядків в матриці планування дає шуканий коефіцієнт.

Регресійний аналіз використовують для перевірки адекватності моделі і значущості коефіцієнтів. У основу регресійного аналізу покладено три постулати:

- параметр оптимізації y є випадкова величина з нормальним законом розподілу;
- дисперсія y не залежить від абсолютної величини y ;
- значення чинників є не випадкові величини.

У тому, що у є випадкова величина зазвичай сумніватися не доводиться. Проте при порушенні нормальності розподілу у ми позбавляємося можливості встановлення вірогідності, з якою пов'язані ті або інші висловлювання. У цьому таїться велика небезпека. За наявності великого експериментального матеріалу гіпотезу про нормальний розподіл можна перевірити стандартними статистичними тестами.

Виконання другого постулату перевіряється за допомогою критерію однорідності дисперсій для усіх рівнів чинників. Порушення цього постулату неприпустимо.

Третій постулат практично означає, що встановлення кожного чинника на заданий рівень і його підтримку проводиться істотно точніше, ніж помилка відтворюваності. Порушення цього постулату призводить до труднощів при реалізації матриці планування, тому зазвичай легко виявляється експериментатором.

Перевірка адекватності моделі.

У деякій підобласті, в яку входять і координати виконаних дослідів, значення функції відгуку, що розраховується по моделі, не повинне відрізнятися від фактичного більше, ніж на деяку припустиму величину. Модель, яка відповідає цій вимозі, називається адекватною.

Для перевірки адекватності моделі спочатку розраховують дисперсію адекватності:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f},$$

де f – число ступенів свободи, яке в даному випадку дорівнює різниці між кількістю рядків матриці планування і кількістю усіх певних коефіцієнтів в моделі, включаючи b_0 .

Потім порівнюють дисперсію адекватності і дисперсію відтворюваності (3.4) за допомогою, наприклад, критерію Фішера. Якщо значення критерію не перевищує табличного, то з відповідною довірчою вірогідністю модель вважають адекватною.

Перевірка значущості коефіцієнтів.

Перевірка значущості кожного коефіцієнта проводиться незалежно. Коефіцієнт є значущим, якщо його абсолютна величина більше його довірчого інтервалу, який складає:

$$\Delta b_j = \pm \frac{ts_{\{y\}}}{\sqrt{N}}.$$

Рух по градієнту.

Градiєнтом функції є вектор, спрямований у бік найшвидшої її зміни:

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

де $\nabla \varphi$ – позначення градієнта,

$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}$ – приватна похідна функції по i -му чиннику,

i, j, k – одиничні вектори напрямку координатних осей.

Отже, складові градієнта є частинні похідні функції відгуку, оцінками яких є коефіцієнти регресії. Змінюючи незалежні змінні пропорційно величинам коефіцієнтів регресії, отримують напрям градієнта функції відгуку або напрям крутого сходження по поверхні відгуку. Тому процедура руху до майже стаціонарної області називається крутим сходженням.

Розрахунок крутого сходження зводиться до того, щоб вибрати крок руху по одному з чинників і розрахувати кроки по інших чинниках пропорційно відповідним коефіцієнтам і інтервалам варіювання. Таким чином, отримують координати (набори значень чинників) для проведення ряду дослідів крутого сходження.

Зазвичай у напрямі крутого сходження проводять 5-10 дослідів. При нагоді досліди проводять одночасно, щоб виключити часовий дрейф. Круте сходження вважається ефективним, якщо хоч би один з реалізованих дослідів дасть кращий результат в порівнянні з найкращим дослідом матриці планування. Серед дослідів крутого сходження вибирається найкращий, і його умови беруться за основний рівень чинників в наступній серії планування експерименту (див. рис. 3.2).

При русі по градієнту можливі п'ять ситуацій, які схематично наведено на рисунку 3.3.

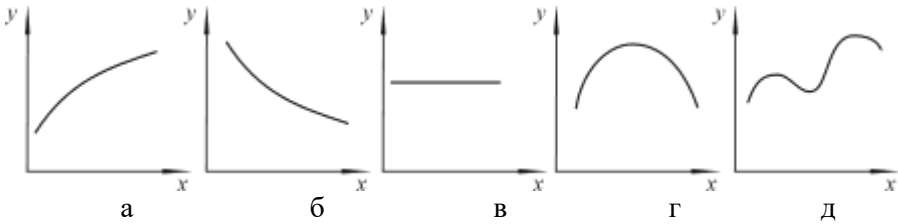


Рисунок 3.3 – Можливі ситуації при русі по градієнту

Найбільш сприятливі випадки відповідають варіантам *а*, *г* і *д*. Тут рух по градієнту виявився ефективним. Випадок *б* ілюструє неефективне круте сходження. Замість очікуваного збільшення параметра оптимізації спостерігається його зменшення. Тут або план експерименту розташований в області оптимуму, або є грубі помилки. У випадку *в* усі досліді на градієнті дають одне і те ж значення.

Якщо круте сходження ефективне і область оптимуму є близькою, можливі два рішення: закінчення дослідження і побудова плану до плану другого порядку в цілях опису області оптимуму.

Якщо область оптимуму далека, рішення одне - побудова плану нового циклу.

3.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Навіщо планувати експеримент?
2. У чому полягає суть планування експерименту?
3. Що таке чорний ящик і якого він кольору?
4. Що таке оптимум і оптимізація?
5. Чи потребує задача оптимізації визначення рівняння цільової функції?
6. У чому полягає метод Бокса-Уілсона?

3.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Варіанти завдань для побудови моделі трибосистеми.
2. Довідкова література.
3. ПК, офісні програми.

3.5 Порядок проведення лабораторної роботи

Для виданого завдання провести усі процедури відповідно до порядку виконання робіт при плануванні експерименту. Результати проведення експерименту відповідно до матриці планування отримують при випробуваннях в реальних умовах, або визначаються викладачем.

3.6 Зміст звіту

Звіт повинен містити перелік чинників досліджуваної трибосистеми; розрахунок коефіцієнтів кореляції; обґрунтування параметра оптимізації або узагальненого параметра оптимізації; матрицю планування повного факторного експерименту або дробової репліки (залежить від кількості чинників); розрахунки: дисперсій відтворюваності, дисперсій адекватності, коефіцієнтів моделі і їх значущості; набори значень чинників для дослідів крутого сходження.

3.7 Рекомендована література

[7, 8].

ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. До лабораторних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.

2. Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.

3. У випадку пожежі чи поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

4. При виконанні робіт необхідно одягнути халат, рукавиці і захисні окуляри.

5. У випадку виявлення ушкоджень обладнання студент мусить негайно повідомити викладачу чи завідувачу лабораторією.

6. При роботі необхідно дотримуватись правил електробезпеки. Пристрій повинен бути заземлений, провідники надійно ізольовані, штепсельні роз'єкти забезпечувати надійний контакт.

7. Не дозволяється проводити огляд, вивчення і ремонт пристрою, коли він знаходиться під напругою.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Тихомиров В.П. Методы моделирования процессов в триботехнических системах / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, В.В. Порошин. – М.: 2004. – 290 с.
2. Браун Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: 1982. – 191 с.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
4. Седов Л. И. Методи подібності і розмірності в механіці. - М.: 1977. - 440 с.
5. Тихомиров В.П. Методи моделювання процесів в триботехнических системах / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, В.В. Порошини. - М.: 2004. - 290 с.
6. Браун Э.Д. Моделювання тертя і зношування в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. - М.: 1982. - 191 с.
7. Адлер Ю.П. Планування експерименту при пошуку оптимальних умов / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: 1976. - 279 с.
8. Тихомиров В.П. Методи моделювання процесів в триботехнических системах / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, В.В. Порошини. - М.: 2004. - 290 с.