

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет “Запорізька політехніка”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи студентів з вивчення дисципліни “Дослідження та випробування механічних систем” для студентів спеціальності 133 “Галузеве машинобудування” освітня програма “Металорізальні верстати та системи” всіх форм навчання.

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з вивчення дисципліни “Дослідження та випробування механічних систем” для студентів спеціальності 133 “Галузеве машинобудування” освітня програма “Металорізальні верстати та системи” всіх форм навчання /Укл. В.В. Солоха. – Запоріжжя: НУ”ЗП”, 2025. – с. 16

Укладач: В.В. Солоха, доцент, к.т.н.

Рецензенти: професор, д.т.н. В.В. Циганов

Відповідальний
за випуск М.В. Фролов, доцент, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
“Металорізальні верстати та
інструменти”
Протокол №____.
від “ ____” 2025 р.

Рекомендовано до видання НМК
машинобудівного факультету
Протокол №____.
від “ ____” 2025

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Дисципліна “Дослідження та випробування механічних систем” є вибірковою дисципліною підготовки магістрів зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування за освітньою програмою “Металорізальні верстати та системи”.

Дисципліна вивчається в 2 семестрі. На її вивчення виділяється 6 навчальних кредити. Загальна кількість годин на вивчення дисципліни розподіляється таким чином (в дужках - для студентів заочної форми навчання): лекції – 30 (6) годин, лабораторні роботи – 30 (2) години, самостійна робота – 120 (172) годин. По закінченню вивчення дисципліни - залік.

Студенти заочної форми протягом семестру виконують 1 контрольну роботу. Лабораторна робота виконується протягом установочної сесії. На цю ж сесію виносяться лекції: 1. Основні принципи планування та проведення експерименту; 2. Повний факторний експеримент; 3. Дослідження металорізальних верстатів.

В робочій програмі до кожної теми зазначені години на самостійну роботу, в дужках для заочної форми навчання.

2 РОБОЧА ПРОГРАМА І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ТЕМ

2.1 Основні принципи планування експерименту – 11 (16) год.

Поняття дослідження та випробування. Дослідження теоретичні та експериментальні. Експерименти натурні та на моделях.

Математичні моделі: статистичні і аналітичні.

Фактори, що впливають на вихідні характеристики об'єкту дослідження. Систематичні та випадкові фактори та їх вплив на вибір методів дослідження. Ефект фактору.

Вимоги, що висувають до факторів планування експерименту.

Методичні вказівки

Усвідомити значення досліджень та випробувань для отримання нового знання про об'єкти та процеси. Ознайомитися з видами досліджень та доцільністю їх в проведення в тих чи інших умовах.

З'ясувати суть фактора та усвідомити, в чому полягає визначення фактора. Ознайомитися з вимогами щодо визначення факторів.

Питання для самоперевірки

1. З якою метою проводяться дослідження технічних систем?
2. В яких умовах доцільно проводити теоретичні дослідження, і коли необхідні експериментальні?
3. В чому полягають особливості натурного експерименту? модельного експерименту?
4. В чому полягає вимога однозначності факторів? сумісності факторів?
5. Що являє собою ефект фактора?

2.2 . Повний факторний експеримент – 12 (17) год.

Вибір основного рівня. Вибір інтервалів варіювання. Планування повного факторного експерименту. Властивості повного факторного експерименту. Повний факторний експеримент та математична модель. Дробовий факторний експеримент. Мінімізація числа дослідів.

Методичні вказівки

Зрозуміти суть планування експерименту, вибору основного рівня та інтервалів варіювання. Навчитися будувати план повного факторного експерименту для різної кількості факторів та визначати коефіцієнти за результатами його реалізації. Зрозуміти значення дробового факторного експерименту.

Питання для самоперевірки

1. Як вибирається основний рівень фактора?
2. З якою метою здійснюється перетворення розмірних факторів у безрозмірні, нормовані?
3. Який експеримент називається повним факторним?
4. Як визначаються коефіцієнти лінійної моделі в повному факторному експерименті?
5. З якою метою застосовується дробовий факторний експеримент?

2.3 Проведення експерименту. Обробка результатів експерименту – 12 (17) год.

Реалізація плану експерименту. Помилки результатів вимірювань.

Дисперсія експерименту, перевірка однорідності дисперсії. Рандомізація дослідів.

Обробка результатів експерименту. Метод найменших квадратів. Регресійний аналіз. Перевірка адекватності моделі. Перевірка значущості коефіцієнтів.

Методичні вказівки

З'ясувати характер помилок, що виникають в процесі проведення експерименту. Звернути увагу на грубі помилки експерименту та їх виявлення. Навчитися визначати розсіювання значень результатів (дисперсію) та оцінювати однорідність дисперсії. Приділити увагу перевірці адекватності моделі та значущості коефіцієнтів.

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняються систематичні похибки досліду від випадкових?
2. Як визначаються грубі помилки досліду?
3. Що називається числом ступенів свободи досліду?
4. Як здійснюється перевірка однорідності дисперсій?
5. Як виконується перевірка адекватності моделі?
6. Якими способами здійснюється перевірка значущості коефіцієнтів регресії?

2.4 Вимірювальна техніка – 14 (19) год.

Засоби вимірювання температури: термоелектричні термометри, термометри опору провідникові і напівпровідникові.

Принцип дії датчиків різних типів: індукційних, індуктивних, ємнісних, п'єзоелектричних, тензометричних, термоелектричних перетворювачів (термопар), термоопорів.

Засоби зняття інформації (чутливі елементи):

- датчики переміщень;
- датчики навантажень;
- датчики температур;
- датчики вібрацій.

Методичні вказівки

Розібратися в принципі роботи термоелектричних термометрів та термометрів опору, особливостях їх застосування. З'ясувати принципи роботи та сфери застосування п'єзоелектричних та тензометричних датчиків, особливості застосування індуктивних датчиків різних типів. Звернути увагу на відмінності в використанні датчиків відносних та абсолютних переміщень.

Питання для самоперевірки

1. На якому принципі базується вимірювання температур термоелектричним термометром?
2. Яким вимогам повинні відповідати матеріали для виготовлення термометрів опору?
3. Що таке п'єзоефект і як він використовується для проведення експериментальних досліджень?
4. Для яких досліджень можуть використовуватися чутливі елементи з тензорезисторами?
5. На якому принципі базується роботи індуктивних чутливих елементів?
6. В чому полягає відмінність абсолютних датчиків для вимірювання вібропереміщень і віброприскорень?

2.5 Вимірювання механічних коливань – 11 (17) год.

Вимірювання параметрів коливальних систем.

Вимірювальні перетворювачі відносних переміщень. Способи з'єднання перетворювача з об'єктом вимірювання.

Вимірювальні перетворювачі абсолютних переміщень.

Вимірювальні перетворювачі вібраційних переміщень, віброшвидкості, віброприскорення.

Методичні вказівки

З'ясувати мету виміру механічних коливань механічних систем.

Вивчити особливості використання вимірювання відносних переміщень.

Зрозуміти принципи вимірювання абсолютних переміщень, відмінності перетворювачів для вимірювання вібропереміщень, віброшвидкості та віброприскорення.

Питання для самоперевірки

1. В чому полягає суть відносних переміщень параметрів коливань?
2. Які способи з'єднання вимірювального перетворювача з об'єктом виміру застосовуються в разі використання перетворювачів відносних переміщень?
3. На чому ґрунтується принцип роботи перетворювачів абсолютних переміщень?
4. В чому полягає відмінність перетворювача вібропереміщень від вимірювального перетворювача віброприскорення?

2.6 Випробування і дослідження металорізальних верстатів – 14 (18) год.

Основні види випробувань верстатів:

- випробування на геометричну та кінематичну точність;
- випробування на статичну жорсткість;
- випробування на вібростійкість;
- визначення температурних полів та температурних деформацій верстатів;
- дослідження точності позиціонування верстатів.

Методичні вказівки

З'ясувати відмінності в поняттях геометричної і кінематичної точності і особливостях їх досліджень. Звернути увагу на схеми прикладення навантаження і вимірювання відтискань в дослідженні жорсткості верстата.

Питання для самоперевірки

1. Від чого залежить геометрична точність верстатів?
2. Як визначається жорсткість системи верстата супорт-шпиндель?
3. Як доцільно визначати температурні деформації верстатів?
4. З якою метою застосовуються прискорені випробування верстатів на надійність?

2.7 Дослідження точності позиціонування верстатів. Умови проведення та розрахунок показників (iso 210-1,2) 10(16) год.

Умови проведення дослідження: тепловий режим верстата; умови навколишнього середовища; режим роботи. Випробування і оцінка обертових осей. Похибка односпрямованого і двоспрямованого позиціонування осі. Складові невизначеності виміру. Невизначеність у зв'язку з компенсацією температури верстата.

Методичні вказівки

Розуміти важливість умов проведення дослідження: температури вузлів верстата, температури середовища. Вивчити засоби та методику проведення дослідження точності позиціонування. З'ясувати особливості оцінки параметрів, що визначають точність позиціонування. Вивчити складові невизначеності виміру.

Питання для самоперевірки

1. За якої температури середовища слід виконувати випробування верстатів?

2. Як визначається інтервал між контрольними точками в яких виконується вимірювання точності позиціонування?

3. Як визначається середнє двоспрямоване позиційне відхилення позиції?

4. Які чинники впливають на похибку вимірювання?

2.8 Аналіз та оцінка динамічних характеристик верстатів – 12 (18) год.

Дослідження власних частот коливань та режимів вібрацій конструкції верстата. Використання ударного тесту для збудження системи верстата. Імпульсні молотки.

Аналіз режимів вібрації та динамічної жорсткості багатоцільового верстата за допомогою методу скінчених елементів.

Дослідження динамічних характеристик системи шпиндель – оправка – інструмент.

Дослідження динамічної якості двохосьових поворотних столів 5-координатного багатоцільового верстата.

Методичні вказівки

З'ясувати необхідність і методику проведення ударного тесту для отримання динамічних характеристик системи верстата.

Вивчити конструкцію імпульсного молотка для проведення імпульсного тесту.

З'ясувати методи дослідження динамічних характеристик та динамічної жорсткості властивих багатоцільовому верстату.

Питання для самоперевірки

1. З якою метою проводяться випробування за допомогою ударного тесту?

2. Як конструктивні елементи імпульсного молотка впливають на вихідні параметри ударного тесту?

3. За допомогою яких методів оцінюють власні частоти та форми мод елементів конструкції верстата?

4. З якою метою дослідники верстатів використовують метод скінчених елементів (МСЕ)?

6. Яким чином можна переглянути результати виконаного аналізу?

2.9 Численні методи розв'язання диференціальних рівнянь 12(17) год.

Зміст методу скінчених елементів.

Дискретизація області.

Лінійні інтерполяційні поліноми.

Двовимірна плоска задача.

Визначення вектору вузлових значень функції.

Методичні вказівки

З'ясувати сутність методу скінчених елементів, особливості розбиття області на елементи і важливість порядку нумерації вузлів. Вивчити типи інтерполяційних поліномів. Зрозуміти значення функції форми вузлів та L – функції. Навчитися визначати вузлові значення функцій для одно та двовимірного елемента.

Питання для самоперевірки

1. Які типи елементів застосовуються для розбиття області в МСЕ?
2. Які відмінності між симплекс-елементом і комплекс-елементом?
3. Як доцільно виконувати нумерацію вузлів для зменшення ширини матриці?
4. Яких значень набуває функція форми в вузлах елемента?
5. Що представляє собою L - функція?

2.10 Система інженерного аналізу “ANSUS”. Робота в системі ANSYS 12(17) год.

Призначення і можливості комплекс ANSYS.

Графічний інтерфейс користувача (GUI). Головне меню (Main Menu) системи.

Визначення властивостей матеріалів. Завдання типу елемента. Розбиття геометричної моделі на елементи.

Прикладення навантаження.

Пов'язані задачі.

Методичні вказівки

Розібратися в особливостях функціонування комплексу ANSYS. З'ясувати можливості створення/імпортування геометричних моделей. Навчитися задавати властивості матеріалів, вибирати типи елементів, розбивати модель на елементи. З'ясувати можливості прикладення навантажень до моделі для температурних та структурних, розрахунків, можливість використання результатів одного виду розрахунків для здійснення іншого аналізу.

Питання для самоперевірки

1. Як виконується імпорт геометричної моделі, отриманої за допомогою графічних редакторів, в систему ANSYS?
2. Як задати властивості матеріалів за допомогою графічного інтерфейсу користувача (GUI)?
3. Як вибрати тип елемента та розбити модель для виконання того чи іншого аналізу?
4. Які види навантаження слід прикладати до моделі для виконання теплового розрахунку?
5. Як здійснити перехід від теплового аналізу до структурного?
6. Яким чином можна переглянути результати виконаного аналізу?

3 ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. Лабораторна робота 1. Дослідження точності позиціювання верстата з ЧПК, 6 год.

Лабораторна робота пов'язана з вивченням тем 2.3 і 2.6.

2. Лабораторна робота 2. Визначення балансу жорсткості токарного верстата (токарно-револьверного автомата), 4 год.

Лабораторна робота пов'язана з вивченням теми 2.6.

3. Лабораторна робота 3. Виготовлення і градуювання термоелектричних термометрів (термопар), 4 год.

Лабораторна робота пов'язана з вивченням теми 2.4.

4. Лабораторна робота 5. Визначення теплопровідності стиків деталей верстатів, 8 год.

Лабораторна робота пов'язана з вивченням тем 2.3, 2.6.

4 КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

4.1 Загальні вказівки

Контрольна робота з дисципліни “Дослідження та випробування механічних систем” виконується студентами заочної форми навчання в 9 семестрі, в якому і вивчається дана дисципліна. Відповіді на контрольні питання мають бути повними та свідчити про поглиблене опрацювання студентом відповідного розділу курсу.

При оформленні контрольної роботи необхідно дотримуватися ДСТУ: ДСТУ 3008-95, СТП 15-11 ЗНТУ. Відповідно до вимог цих

документів, контрольна робота повинна бути в рукописному вигляді на одній стороні стандартних аркушів паперу формату А4 (297 x 210).. Текст відповідей на питання контрольної роботи доцільно розділити на пункти, які повинні мати порядкові номери.

Відповіді на контрольні питання, в разі потреби, повинні супроводжуватися необхідними кресленнями, ескізами, схемами, описами і розрахунками. Наведені ілюстрації повинні бути чіткими і виконані в зручному для читання масштабі.

Всі наведені в контрольній роботі ілюстрації повинні бути пронумеровані арабськими цифрами в межах одного питання. Номер ілюстрації повинен складатися з номера питання і номера рисунка, розділених крапкою.

В тексті контрольної роботи зазначаються посилання на довідники, підручники та інші матеріали використані для виконання роботи.

Контрольна робота повинна бути зброшуровані в зошит з щільною обкладинкою і титульним аркушем, на якому в обов'язковому порядку повинен бути зазначений шифр (номер залікової книжки) студента. Усі аркуші контрольної роботи повинні бути пронумеровані, причому першим - титульний лист. За ним поміщають текст контрольних питань. В кінці роботи наводять перелік використаної літератури

Контрольна робота повинна бути подана на перевірку викладачу і в разі відсутності зауважень захищена студентом до початку екзаменаційної сесії. Номер варіанта завдання вибирається студентом відповідно до шифру його залікової книжки.

Визначення варіанту контрольного завдання

Останні дві цифри залікової книжки	Номер варіанту
01...20, 21...40, 41...60, 61...80, 81...100	01...20

4.2 Контрольні завдання

Варіанти контрольних завдань з дисципліни «Дослідження та випробування механічних систем»

Варіант 1

1. Дослідження температурних полів та температурних деформацій металорізальних верстатів.

2. Регресійний аналіз. Перевірка адекватності моделі. Перевірка значущості коефіцієнтів.

Варіант 2

1. Принципи планування експерименту. Основні етапи побудови математичної моделі.
2. Ударний (імпульсний молотковий) тест для динамічних досліджень верстатів.

Варіант 3

1. Фактори в експерименті. Вибір факторів. Вимоги до факторів. Ефект фактора.
2. Випробування верстатів на статичну жорсткість. Техніка для проведення випробувань..

Варіант 4

1. Повний факторний експеримент. Вибір основного рівня. Вибір інтервалів варіювання. Властивості повного факторного експерименту.
2. Динамічні дослідження елементів верстатних систем з використанням скінчено-елементного аналізу.

Варіант 5

1. Планування і проведення повного факторного експерименту.
2. Дослідження точності позиціонування верстатів.

Варіант 6

1. Повний факторний експеримент і математична модель. Визначення коефіцієнтів рівняння.
2. Випробування верстатів на геометричну та кінематичну точність.

Варіант 7

1. Дробовий факторний експеримент. Дробові репліки.
2. Випробування верстатів на статичну жорсткість. Техніка для проведення випробувань.

Варіант 8

1. Проведення експерименту. Середнє арифметичне, середнє квадратичне відхилення. Дисперсія. Перевірка однорідності дисперсії.
2. Вимірювання механічних коливань. Вимірювальні перетворювачі абсолютних переміщень.

Варіант 9

1. Дисперсія параметру оптимізації.

2. Вимірювання механічних коливань. Вимірювальні перетворювачі відносних переміщень.

Варіант 10

1. Обробка результатів експериментів. Метод найменших квадратів.
2. Індуктивні чутливі елементи.

Варіант 11

1. Рандомізація умов експерименту.
2. Дослідження точності позиціювання верстатів.

Варіант 12

1. Регресійний аналіз. Перевірка адекватності моделі. Перевірка значущості коефіцієнтів.
2. Чутливі елементи для вимірювальних перетворювачів. П'єзоелектричні чутливі елементи.

Варіант 13

1. Основні поняття статистики.
2. Засоби вимірювання температури. Термометри опору.

Варіант 14

1. Перевірка статистичних гіпотез.
2. Засоби вимірювання температури. Термоелектричні термометри.

Варіант 15

1. Рандомізація експерименту.
2. Тензометричні перетворювачі.

Варіант 16

1. Повний факторний експеримент і математична модель. Визначення коефіцієнтів рівняння

2. Випробування верстатів на технологічну надійність

Варіант 17

1. Фактори в експерименті. Вибір факторів. Вимоги до факторів. Ефект фактора.

2. Випробування верстатів на статичну жорсткість. Техніка для проведення випробувань.

Варіант 18

1. Обробка результатів експериментів. Метод найменших квадратів.

2. Вимірювання механічних коливань. Вимірювальні перетворювачі абсолютних переміщень.

Варіант 19

1. Рандомізація умов експерименту.
2. Дослідження точності позиціювання верстатів.

Варіант 20

1. Дисперсія параметру оптимізації. Перевірка однорідності дисперсії.
2. Динамічні дослідження елементів верстатних систем з використанням скінчено-елементного аналізу.

5 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**Базова**

1. Конспект лекцій з дисципліни “Дослідження та випробування механічних систем” для студентів спеціальності 133 “Галузеве машинобудування” за освітньою програмою “Металорізальні верстати та системи” /Укл. В.В. Солоха. - Запоріжжя: НУ“ЗП”, 2025. - с. 122.
2. Астанін В. В., Зайончковський Г. Й., Солоха В. В. Дослідження та випробування механічних систем: навчальний посібник. – Київ. НАУ, 2009 -112 с.
<http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/11268>
3. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): Навч. посібник/ Б.О. Пальчевський. – Львів: Світ, 2001. – 232 с.
4. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Підручник. - Житомир: ЖІТІ, 2001. - 612 с.
<https://lib.in.ua/158742-pidruchnyk-matematychne-modeliuvannia-proczesiv-ta-system-mehaniky/>
5. Саленко О.Ф., Вакуленко С.В. Наукові дослідження складних технічних систем: навч.посібник. ч.1. для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» / О.Ф. Саленко, С.В. Вакуленко. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 102 с.
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/cc5eb08c-378a-49ea-85b4-e284ba2f0147/content>
6. Бойко І.А., Солоха В.В., Іщенко Л.Й. Динамічний аналіз поворотного стола 5-координатного обробного центру. Вісник

- чернігівського державного технологічного університету. № 1 (71), 2014, стор. 134-143.
7. Температурні вимірювання. Довідник.- Під ред. Геращенко О.А.-Київ: Наукова думка, 1999.- 704 с
 8. Поліщук Є.С. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник – М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т "Львівська політехніка"; 2-е вид., доп. та перероб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 544 с.
<https://xn--e1ajqk.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Polishhuk-.S.-Metrologiya-ta-vimiryuvalna-tehnika-2003.pdf>
 9. Montgomery, Douglas C. Design and analysis of experiments / Douglas C. Montgomery. — Ninth Edition. John Wiley & Sons, Inc. – 2017. - 749 p.
(https://www.researchgate.net/publication/362079778_Design_and_Analysis_of_Experiments_9th_Edition)
 10. Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. The Finite Element Method. First edition. V. 1: The Basis/ Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000. – 708 p.

Інформаційні ресурси

11. Bernhard F. Technische Temperaturmessung : physikalische und meßtechnische Grundlagen, Sensoren und Meßverfahren, Meßfehler und Calibrierung ; Handbuch für Forschung und Entwicklung, Anwendungspraxis und Studium ; mit 297 Tabellen und 202 Berechnungsbeispielen / (Hrsg.) XIV, 1460 S. : Ill., graph. Darst.
<https://www.pdfdrive.to/dl/handbuch-der-technischen-temperaturmessung>.
12. ISO 230-2:2014/ Test code for machine tools. Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes
13. Analysis of Dynamic Characteristics and Evaluation of Dynamic Stiffness of a 5-Axis Multi-tasking Machine Tool by using F.E.M and Exciter Test. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4505589>.
14. Dynamic modeling and analysis of motorized milling spindles for optimizing the spindle cutting performance. Dr. Sinan Badrawy, Engineering Manager Moore Nanotechnology Systems, LLC.

15. A. Erturk, H.N. Özguëven, E. Budak, Analytical modeling of spindle–tool dynamics on machine tools using Timoshenko beam model and receptance coupling for the prediction of tool point FRF. <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-machine-tools-and-manufacture/vol/46/issue/15>.