

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем
(№ 202)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Н. В. Руденко



(підпис)

(ініціали та прізвище)

«30» 08 2024 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ОBOB'ЯЗКОВОЇ
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Прикладна механіка

(назва навчальної дисципліни)

Галузь знань:

13 «Механічна інженерія»

(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність:

131 «Прикладна механіка»

(код та найменування спеціальності)

Освітня програма: «Роботомеханічні системи і логістичні комплекси»

(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Харків 2024 рік

Розробник: Нарижний О.Г., доцент, к.т.н., доцент
(прізвище та ініціали, посада, науковий ступінь та вчене звання)



(підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри теоретичної механіки,
машинознавства та роботомеханічних систем _____
(назва кафедри)

Протокол № 10__ від «27_» _06__ 2024 р.

Завідувач кафедри докт. техн. наук, проф.
(науковий ступінь та вчене звання)



(підпис)

О.О. Баранов
(ініціали та прізвище)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)
Кількість кредитів – 6	<p>Галузь знань <u>13 «Механічна інженерія»</u> <small>(шифр та найменування)</small></p> <p>Спеціальність <u>131 «Прикладна механіка»</u> <small>(код та найменування)</small></p> <p>Освітня програма <u>«Роботомеханічні системи і логістичні комплекси»</u> <small>(найменування)</small></p> <p>Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)</p>	Обов'язкова
Кількість модулів – 1		Навчальний рік
Кількість змістовних модулів – 2		2024/2025
Індивідуальне завдання «Кінематика та динаміка маніпулятора» <small>(назва)</small>		Семестр
Загальна кількість годин – 96/180		4-й
Кількість тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 6 самостійної роботи студента – 5,25		Лекції ¹⁾
		48 години
		Практичні, семінарські¹⁾
		48 години
		Лабораторні ¹⁾
	___ годин	
	Самостійна робота	
84 година		
Вид контролю	іспит	

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить: 96/84

¹⁾ Аудиторне навантаження може бути зменшене або збільшене на одну годину в залежності від розкладу занять.

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: підготовка фахівців, здатних розв'язувати складні задачі і проблеми проектування та дослідження роботів-маніпуляторів за допомогою методів механіки.

Завдання: вивчення основних кінематичних співвідношень, які дозволяють вирішити задачі положення та керування маніпуляторами; вивчення основних положень стосовно динаміки маніпуляційних механізмів, математичних моделей руху та методик їх аналізу; будівництво моделей механічних систем роботів та моделей, пов'язаних з рішенням задач керування роботами за допомогою сучасних методів проектування.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких **компетентностей:**

Загальні компетентності спеціальності (ЗК)

- ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ЗК2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.
- ЗК3. Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми.
- ЗК4. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- ЗК6. Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків.
- ЗК7. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

Фахові компетентності спеціальності (ФК)

- ФК1. Здатність аналізу матеріалів, конструкцій та процесів на основі законів, теорій та методів математики, природничих наук і прикладної механіки.
- ФК2. Здатність робити оцінки параметрів працездатності матеріалів, конструкцій і машин в експлуатаційних умовах та знаходити відповідні рішення для забезпечення заданого рівня надійності конструкцій і процесів, в тому числі і за наявності деякої невизначеності.
- ФК5. Здатність використовувати аналітичні та чисельні математичні методи для вирішення задач прикладної механіки, зокрема здійснювати розрахунки на міцність, витривалість, стійкість, довговічність, жорсткість в процесі статичного та динамічного навантаження з метою оцінки надійності деталей і конструкцій машин.
- ФК6. Здатність виконувати технічні вимірювання, одержувати, аналізувати та критично оцінювати результати вимірювань.
- ФК7. Здатність застосовувати комп'ютеризовані системи проектування (САГ)), виробництва (САМ), інженерних досліджень (САЕ) та спеціалізоване прикладне програмне забезпечення для вирішення інженерних завдань з прикладної механіки.
- ФК10. Здатність описувати та класифікувати широке коло технічних об'єктів та процесів, що ґрунтується на глибокому знанні та розумінні основних механічних теорій та практик, а також базових знаннях суміжних наук.
- ФК12. Знання і розуміння основних співвідношень стосовно кінематики і динаміки маніпуляторів, математичних моделей руху та методик їх аналізу.

Програмні результати навчання. В результаті засвоєння курсу «Прикладна механіка» студент повинен бути здатний:

- ПРН1 - вибирати та застосовувати для розв'язання задач прикладної механіки придатні математичні методи.
- ПРН3 - виконувати розрахунки на міцність, витривалість, стійкість, довговічність, жорсткість деталей машин.
- ПРН6 - створювати і теоретично обґрунтовувати конструкції машин, механізмів та їх елементів на основі методів прикладної механіки, загальних принципів конструювання, теорії взаємозамінності, стандартних методик розрахунку деталей машин.
- ПРН16 - вільно спілкуватися з професійних питань усно і письмово державною та іноземною мовою, включати знання спеціальної термінології та навички міжособистісного спілкування.

- ПРН18 - Формулювати моделі механічних систем роботів, пов'язаних з рішенням задач кінематики і динаміки маніпуляторів, розраховувати траєкторії руху робочих органів роботів.

3. Програма навчальної дисципліни

Модуль 1.

Змістовий модуль 1. Кінематика маніпуляторів.

Тема 1. Просторові описи та перетворення

Вступ в дисципліну.

Описи положення, орієнтації та систем координат. Відображення: зміна описів від системи до системи. Оператори переносу, обертання та перетворення. Стислий огляд інтерпретацій. Перетворювальна арифметика. Рівняння перетворення. Докладніше про подання орієнтації. Перетворення вільних векторів. Розрахункові міркування.

Тема 2. Пряма кінематика маніпулятора

Опис ланки. Опис з'єднань ланок робота. Правила прикріплення систем координат до ланок. Кінематика маніпулятора. Простір приводу, простір з'єднань та декартовий простір. Приклади : кінематика двох промислових роботів. Системи зі стандартними назвами. Де знаходиться інструмент? Обчислювальні міркування.

Тема 3. Зворотна кінематика маніпулятора

Розв'язність задачі. Поняття підпространства маніпулятора при $n < 6$. Алгебраїчне та геометричне рішення. Алгебраїчне рішення шляхом приведення до полінома. Рішення Пайпера, коли три осі перетинаються. Приклади зворотної кінематики маніпулятора. Стандартні системи. Рішення маніпулятора. Повторюваність та точність. Обчислювальні міркування.

Тема 4. Якобієви матриці та якобіани

Позначення для положення та орієнтації, які змінюються за часом. Лінійна та обертальна швидкість твердих тіл. Більше про кутову швидкість. Рух ланок робота. «Поширення» швидкості від ланки до ланки. Якобіани. Сингулярності. Статичні сили в маніпуляторах. Якобіани в області сил. Декартове перетворення швидкостей і статичних сил.

Модульний контроль.

Змістовний модуль №2. Динаміка та планування траєкторій

Тема 5. Динаміка маніпулятора

Метод Лагранжа-Ейлера. Швидкість довільної точки ланки маніпулятора. Кінетична енергія маніпулятора. Потенціальна енергія маніпулятора. Рівняння руху маніпулятора. Рівняння руху маніпулятора з обертальними зчленуваннями. Приклад: дволанковий маніпулятор.

Рівняння Н'ютона-Ейлера. Обертальні системи координат. Рухомі системи координат. Кінематика ланцюгів. Рекурентні рівняння динаміки маніпулятора. Рекурентні рівняння руху ланки в системі координат, пов'язаної з цією ланкою. Розрахунковий алгоритм. Приклад: дволанковий маніпулятор.

Узагальнені рівняння Д'Аламбера.

Емпіричний підхід до формулювання спрощеної динамічної моделі

Приклад: дволанковий маніпулятор. Висновки

Тема 6. Планування траєкторій маніпуляторів.

Загальна задача планування траєкторій. Згладжені траєкторії у просторі приєднаних змінних. Опис траєкторій кубічними сплайнами.

Планування траєкторій в декартових координатах. Метод, що використовує однорідну матрицю перетворень

Спряження між двома частинами траєкторії. Планування траєкторій з використанням кватерніонів. Приклади.

Планування траєкторій в декартових координатах. Алгоритм формування траєкторій з обмеженими відхиленнями.

Опис траєкторій за допомогою кубічних сплайнів з обмеженнями моментів. Обмеження за швидкістю. Обмеження за прискоренням. Обмеження за швидкістю зміни прискорення.

Заключний огляд питань курсу.

Модульний контроль.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістовних модулів і тем	Кількість годин				
	Усього	У тому числі			
		л	п	лаб.	с. р.
1	2	3	4	5	6
Модуль 1					
Змістовний модуль 1. Кінематика маніпуляторів					
Тема 1. Просторові описи та перетворення	26	8	8		10
Тема 2. Пряма інематика маніпулятора	26	8	8		10
Тема 3. Зворотна кінематика маніпулятора.	16	6	2		8
Тема 4. Якобієви матриці та якобіани	12	6	2		4
Модульний контроль	2		2		
Разом за змістовним модулем 1	82	28	22		32
Змістовний модуль 2. Динаміка та планування траєкторій					
Тема5. Динаміка маніпулятора	58	14	18		26
Тема 6. Планування траєкторій маніпуляторів	18	6	6		6
Модульний контроль	2		2		
Разом за змістовним модулем 2	78	20	26		32
Усього годин					
Індивідуальне завдання	20				20
Контрольний захід (іспит)					
Усього годин	180	48	48		84

5. Теми семінарських занять

Семінарських занять немає.

6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин

1	Ознайомлення з Маткадом.	2
2	Операції з матрицями обертання та векторами зсуву.	2
3	Операції з матрицями однорідного перетворення.	2
4	Оператори переносу, обертання та перетворення.	2
5	Складне та зворотне перетворення для опису положення вектору і системи. Рівняння перетворення.	2
6	Будова маніпулятора. Ступінь рухливості маніпулятора. Маневреність маніпулятора.	2
7	Параметри Денавіта-Хартенберга. Метод Денавіта-Хартенберга.	4
8	Зворотна задача кінематики на прикладі маніпулятора Unimation PUMA 560.	2
9	Якобієві матриці та якобіани. Знаходження швидкості та прискорення точки, кутової швидкості та кутового прискорення ланки.	2
10	Застосування принципу Даламбера для знаходження реакцій в кінематичних парах (розглянути на прикладі обов'язкової розрахункової задачі).	2
11	Тензор інерції ланки маніпулятора.	2
12	Внутрішні ітерації для обчислення сил і крутних моментів.	2
13	Метод Ньютона–Ейлера для визначення рівняння руху маніпулятора.	2
14	Метод Лагранжа для визначення рівняння руху маніпулятора.	2
15	Рівняння декартового простору станів	2
16	Рівняння конфігураційного простору.	2
17	Рівняння крутного моменту в декартовому просторі конфігурацій.	2
18	Узагальнений метод Даламбера.	2
19	Планування траєкторій маніпуляторів у приєднаних координатах.	2
20	Планування траєкторій в декартових координатах.	2
21	Планування траєкторій з використання кубічних сплайнів.	2
11	Модульний контроль	4
	Разом	48

7. Теми лабораторних занять

Лабораторних занять немає

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Просторові описи та перетворення	10
2	Пряма кінематика маніпулятора	10
3	Зворотна кінематика маніпулятора.	8
4	Якобієві матриці та якобіани	4
5	Динаміка маніпулятора	26
6	Планування траєкторій маніпуляторів	6
7	Виконання індивідуального завдання	20
	Разом	84

9. Індивідуальні завдання

Індивідуальне завдання «Кінематика та динаміка маніпулятора»

10. Методи навчання

Проведення аудиторних лекцій, практичних занять, індивідуальні консультації, самостійна робота студентів по виконанню індивідуального завдання, самостійна робота студентів за рекомендованими матеріалами.

11. Методи контролю

Проведення поточного контролю, письмового модульного контролю, виконання та захист індивідуального завдання, фінальний контроль у вигляді іспитів.

12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

12.1. Розподіл балів, які отримують студенти (кількісні критерії оцінювання)

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Змістовний модуль 1			
Робота на лекціях	0...1	14	0...14
Робота на практичних заняттях	0...1	10	0...10
Модульний контроль	0...20	1	0...20
Змістовний модуль 2			
Робота на лекціях	0...1	10	0...10
Робота на практичних заняттях	0...1	12	0...12
Модульний контроль	0...14	1	0...14
Виконання та захист РГР			20
Всього за семестр			0...100

Семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування та за наявності допуску до іспиту. При складанні семестрового іспиту студент має можливість отримати максимум 100 балів.

Білет для іспиту складається з двох теоретичних питань та однієї задачі. Максимальна кількість балів за одне теоретичне питання –20, за задачу –60. Загальна максимальна кількість балів дорівнює 100 балів

12.2. Якісні критерії оцінювання

Необхідний обсяг знань для одержання позитивної оцінки:

1. Предмет та метод дисципліни.
2. Основні поняття. Зв'язок з іншими науковими та учбовими дисциплінами.
3. Основні задачі дисципліни.
4. Довідки з алгебри матриць.
5. Пряма задача кінематики.
6. Матриці елементарного повороту.
7. Матриці складного повороту.
8. Матриця повороту відносно довільної осі.
9. Представлення матриць за допомогою кутів Ейлера.
10. Геометричний сенс матриці повороту.
11. Геометричний сенс однорідної матриці перетворень.
12. Однорідна матриця послідовності перетворень.
13. Обертання однорідної матриці

14. Ланки, кінематичні пари, їх параметри.
15. Метод визначення систем координат за Денавітом-Хартенбергом.
16. Класифікація маніпуляторів.
17. Алгоритм побудови систем локальних координат.
18. Рівняння кінематики та матриця маніпулятора.
19. Опис орієнтації хвату за допомогою кутів Ейлера.
20. Опис орієнтації хвату за допомогою кутів крену, тангажу та рискання.
21. Метод Лагранжа-Ейлера.
22. Швидкість довільної точки маніпулятора.
23. Кінетична енергія маніпулятора.
24. Потенційна енергія маніпулятора.
25. Рівняння руху маніпулятора.
26. Загальні рівняння руху маніпулятора.
27. Рівняння руху маніпулятора з оберतालними парами.
28. Вектор сил інерції.
29. Приклад: двох ланковий маніпулятор.
30. Загальна задача планування траєкторій.
31. Згладжені траєкторії у просторі приєднаних змінних.
32. Опис траєкторій кубічними сплайнами.
33. Планування траєкторій в декартових координатах. Метод, що використовує однорідну матрицю перетворень
34. Спряження між двома частинами траєкторії.
35. Планування траєкторій з використанням кватерніонів. Приклади.
36. Планування траєкторій в декартових координатах. Алгоритм формування траєкторій з обмеженими відхиленнями.
37. Опис траєкторій за допомогою кубічних сплайнів з обмеженнями моментів.
38. Опис траєкторій за допомогою кубічних сплайнів з обмеженням за швидкістю.
39. Опис траєкторій за допомогою кубічних сплайнів з обмеженням за прискоренням.
40. Опис траєкторій за допомогою кубічних сплайнів з обмеженням за швидкістю зміни прискорення.

Необхідний обсяг умінь для одержання позитивної оцінки:

1. Основи програмування та рішення задач в системі MathCAD.
2. Операції матричної алгебри.
3. Побудова елементарних матриць обертання
4. Побудова матриць послідовностей обертання
5. Рішення прямої задачі кінематики.
6. Рішення зворотної задачі кінематики.
7. Побудова елементарних однорідних матриць перетворень
8. Побудова однорідних матриць послідовності перетворень
9. Метод Денавіта-Хартенберга на прикладі маніпулятора ПУМА
10. Побудова рівнянь руху маніпулятора
11. Рішення задачі динаміка маніпулятора за методом Лагранжа-Ейлера
12. Рішення задачі динаміка маніпулятора за методом кінетостатики
13. Планування траєкторій в декартових координатах
14. Планування траєкторій з використанням кватерніонів
15. Використання кубічних сплайнів з обмеженнями моментів

12.3 Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

Задовільно (60-74). Мати мінімум знань та умінь. Знати основні поняття та закони кінематики і динаміки маніпуляторів. Виконати та захистити домашнє завдання. Вміти

самостійно формулювати однорідні матриці простих та складних перетворень, розраховувати елементи матриць за допомогою MathCAD. Вміти за допомогою викладача формулювати пряму та зворотню задачі кінематики та динаміки маніпулятора. Вміти формулювати задачу планування траєкторії.

Добре (75 - 89). Знати закони кінематики та динаміки маніпуляторів та їх теоретичне обґрунтування. Виконати та захистити домашнє завдання. Вміти самостійно формулювати та за допомогою викладача вирішувати прямі та зворотні задачі кінематики, динаміки та планування траєкторій, а також пояснювати результати, отримані в результаті вирішення задач.

Відмінно (90 - 100). Повно знати основний матеріал курсу. Виконати та відмінно захистити домашнє завдання. Вміти самостійно:

- розшукувати та усвідомлювати теоретичний матеріал з літературних джерел;
- формулювати та вирішувати задачі кінематики, динаміки та планування траєкторій маніпуляторів за допомогою MathCAD;
- аналізувати та пояснювати отримані результати рішення задач.

Шкала оцінювання: бальна і традиційна

Сума балів	Оцінка за традиційною шкалою
	Іспит, диференційований залік
90 – 100	Відмінно
75 – 89	Добре
60 – 74	Задовільно
0 – 59	Незадовільно

13. Методичне забезпечення

1. Меньшиков В.О. Динаміка механізмів: навч. посіб. Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харк. авіац. ін-т", 2016. 91 с. http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Menshukov_Dunamika_Mehanizmov.pdf
2. Усік В.В. Курс теорії механізмів і машин: навч. посіб.- Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харк. авіац. ін-т", 2019. 86 с. http://library.khai.edu/library/fulltexts/Knigi/Usik_Kurs_Teoriyi.pdf

14. Рекомендована література

Базова

1. Елементи робототехнічних пристроїв і модулі ГВС: Підручник /За заг. ред. Л.С.Ямпольського. – К.: Вища шк., 1992. – 431 с.
2. Основи робототехніки. Навчальний посібник/ Н.В. Морзе, Л.О. Варченко_Троценко, М.А. Гладун.- Кам'янець-Подільський ПП Буйницький О.А., 2016.- 184 с. ISBN -617-608-063-3
3. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.

Допоміжна

1. Craig J.J. Introduction to robotics. Mechanics end control. Pearson Prentice hill, 2005.- 408 p.
2. Fu K.S., Gonzalez R.C.,Lee C.S.G. Robotics: control, sensing, vision and intelligence.- McGraw-Hill, 1987.-594 p.

16. Інформаційні ресурси

<https://education.khai.edu/department/202>
<https://k202.tilda.ws/>