

Міністерство науки та освіти України
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”

Кафедра теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем
№202 –

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник проектної групи

 Руденко Н.В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

« 30 » 08 2021 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА ОБОВ'ЯЗКОВОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Динамічна стійкість промислових роботів
(назва навчальної дисципліни)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальності: 131 «Прикладна механіка»
(код та найменування спеціальності)

Освітня програма: «Роботомеханічні системи та логістичні комплекси»
(найменування)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Харків 2021 рік

Розробник Нарижний О.Г., доцент, к.т.н., доцент

(прізвище та ініціали, посада, наукова ступінь та вчене звання)



Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри №202 – теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем.

Протокол № 11 від «30 » 06 2021 р.

Завідувач кафедри №202 докт. техн. наук, проф.

(наукова 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–5,5	Галузь знань <u>13 «Механічна інженерія»</u> (шифр та найменування) Спеціальність <u>131 «Прикладна механіка»</u> (код та найменування) Освітня програма <u>«Роботомеханічні системи і логістичні комплекси»</u> (найменування) Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)	Обов'язкова
Кількість модулів 1		Навчальний рік
Кількість змістових модулів 2		2021/ 2022
Індивідуальне завдання РГР «Аналіз стійкості руху робота» (назва)		Семестр
Загальна кількість годин – денна –60/105		_ 8 _-й
		Лекції¹⁾
		36 годин
		Практичні, семінарські¹⁾
		_ _ годин
		Лабораторні¹⁾
	24 годин	
	Самостійна робота	
	105_ годин	
	Вид контролю	
	іспит	
Кількість тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 6,0 самостійної роботи студента – 10,5		

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить: для денної форми навчання –60/105

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

Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета вивчення – формування знань щодо особливостей динаміки складних робото-механічних систем з урахуванням коливань та ударів, пружності та в'язкості зв'язків та їх впливу на точність і стійкість руху та позиціонування, формування навичок вирішення задач динаміки за аналітичними та числовими методами за допомогою комп'ютерних програм.

Завдання вивчення - вивчення основних понять та законів кінематики та динаміки систем твердих тіл з в'язко-пружними зв'язками, зокрема стрижнів, валів та балок, для використання в розрахунках механічних процесів та станів.

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

Фахові компетентності спеціальності (ФК)

- ФК3 – 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.
- ФК6. Здатність виконувати технічні вимірювання, одержувати, аналізувати та критично оцінювати результати вимірювань.
- ФК7. Здатність використовувати комп'ютеризовані системи проектування (CAD), виробництва (CAM), інженерних досліджень (CAE) та спеціалізоване прикладне програмне забезпечення для вирішення інженерних завдань з прикладної механіки.
- ФК8 – здатність до практичного використання комп'ютеризованих систем проектування (CAD), виробництва (CAM) і інженерних досліджень (CAE).
- ФК9 – використовувати необхідні для побудови моделей знання принципів дії і математичного опису складових частин мехатронних і робототехнічних систем.
- 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.
- ФК11 – здатність застосовувати знання щодо особливостей динаміки складних робото-механічних систем з урахуванням коливань та ударів, пружності та в'язкості зв'язків та їх впливу на точність і стійкість руху та позиціонування, формування навичок вирішення задач динаміки за аналітичними та числовими методами за допомогою комп'ютерних програм.

Результати навчання. В результаті засвоєння курсу «Динамічна стійкість промислових роботів» студент повинен бути здатний:

- ПРН5 – використовувати математичні методи при виконанні проектно-конструкторських робіт.
- ПРН8 – визначати основні види та чинники кінематичних та динамічних похибок, властивих промисловим роботам, умови їх виникнення, а також методи запобігання похибок і шкідливих коливань.
- ПРН9 – використовувати основні закони динаміки, зокрема стрижнів, валів та балок, закони деформування пружних, в'язких та пластичних середовищ.
- ПРН10 – формулювати задачі механічного дослідження роботомеханічних систем, адекватні математичні моделі механічного руху робото-механічних систем з урахування їх властивостей, навантаження та спирання; розраховувати параметри математичних моделей, що відображують властивості, геометрію, зв'язки між елементами механічних систем.
- ПРН11 – застосовувати основні принципи проектування та керування маніпуляційних механізмів, обирати метод для рішення конкретної прикладної задачі кінематики або динаміки механізмів.
- ПРН12 – виконувати розрахунки на міцність, витривалість, стійкість, довговічність, жорсткість деталей, інструментів та металорізального обладнання.
- ПРН13 – обирати та розраховувати деталі та ланки робочих механізмів ГР, виконувати захватних пристроїв.

Міждисциплінарні зв'язки: вивчення курсу «Динамічна стійкість промислових роботів» базується на загальних знаннях з таких дисциплін таких як «Автоматизовані системи управління виробництвом» , «Електромеханічні приводи роботів та верстатів з ЧПК» та є базою для написання дипломної роботи бакалавра.

3. Програма навчальної дисципліни

Модуль 1.

Змістовний модуль 1. Математичний опис руху механічних систем

Тема 1. Вступ до дисципліни.

Коливання систем з одним ступенем руху. Одержання рівнянь руху математичного маятника; лінійність та не лінійність рівняння; лінеаризація диференційного рівняння руху. Лінійне рівняння: власні коливання, амплітуда та частота коливань. Демпфування систем. Вимушені коливання. Якісні характеристики коливальної системи.

Тема 2. Коливання систем з двома ступенями вільності.

Двохступеневий маніпулятор, нелінійність рівнянь його руху. Лінійна система; вивід рівнянь руху, векторно-матрична форма. Перетворення до виду системи рівнянь першого порядку. Рішення системи диференційних рівнянь. Аналіз рішень.

Тема 3. Коливання систем з скінченною кількістю ступенів вільності.

Отримання рівнянь руху. Аналіз та характеристика рівнянь. Матрична форма рівнянь. Рішення рівнянь руху.

Тема 4. Континуальні коливальні системи.

Поздовжні коливання стержнів. Отримання рівнянь вільного руху. Спектр власних частот. Рішення рівнянь руху. Характеристика та аналіз рішення.

Тема 5. Крутні коливання валів.

Отримання рівнянь руху. Власні коливання. Спектр власних частот. Рішення рівнянь вимушених коливань у вигляді суперпозиції власних форм. Характеристика та аналіз рішення.

Тема 6. Згінні коливання балок.

Отримання рівнянь руху. Власні коливання, власні форми та власні частоти. Властивості власних форм (ортогональність). Рішення рівняння вимушених коливань у вигляді суперпозиції власних форм. Характеристика та аналіз рішення.

Змістовний модуль 2. Основи теорії стійкості руху та покою механічних систем.

Тема 7. Основні поняття та визначення.

Диференційне рівняння руху. Незбурений та збурений рух системи. Міра відхилення руху системи. Поняття про стійкість руху. Асимптотично-стійкий рух. Нестійкий рух. Диференційне рівняння збуреного руху. Перетворення до виду ЗДР першого порядку, фазові координати. Зауваження. Приклади: а) вільні коливання фізичного маятника; б) сферичний рух твердого тіла під дією зовнішніх сил.

Тема 8. Лінеаризація диференційних рівнянь.

Переваги лінійних рівнянь - наявність аналітичних рішень и вигляді явних функцій. Процедура лінеаризації. Приклад: пружна система з нелінійною характеристикою. Стійкість лінійних систем. Формулювання задачі на власні значення. Зауваження щодо характеру рішення. Приклад: аналіз диференційного рівняння руху.

Тема 9. Теореми Ляпунова щодо стійкості за першим наближенням.

Три теореми (без доказу) першого методу. Приклад: система двох ЗДР. Теореми другого методу Ляпунова. Властивості функцій Ляпунова. Розклад в ряд Маклорена. Графічна інтерпретація. Зауваження.

Тема 10. Теорема другого методу щодо стійкості руху.

Доказ теореми. Аналіз знаковизначеності функції Ляпунова. Приклади: а) аналіз позитивної визначеності функції; б) аналіз стійкості обертання твердого тіла.

Тема 11. Теорема Лагранжа щодо стійкості рівноваги консервативної системи.

Доказ теореми. Приклад: аналіз покою математичного маятника. Критерії стійкості руху лінійних систем. Алгебраїчний критерій Гурвіца. Приклад: диференціальне рівняння другого ступеня.

Тема 12. Приклади аналізу стійкості руху.

Стійкість руху двох ступеневого гіростабілізатора. Критерій Вишнеградського. Приклад: стійкість руху двигуна внутрішнього згоряння. Частотний критерій стійкості руху Михайлова. Огляд курсу.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	усього	у тому числі			
		л	п	лаб	с.р.
1	2	3	4	5	6
Модуль 1					
Змістовий модуль 1. Математичний опис руху механічних систем					
Тема 1. Вступ до дисципліни	14	6		4	4
Тема 2. Коливання систем з двома ступенями вільності.	10	4		2	4
Тема 3. Коливання систем з скінченною кількістю ступенів вільності..	14	6		4	4
Тема 4. Континуальні коливальні системи.	6	2		0	4
Тема 5. Круті коливання валів.	8	2		2	4
Тема 6. Згінні коливання балок.	11	4		2	5
Модульний контроль	2			2	
Разом за змістовним модулем 1	65	24		16	25
Змістовний модуль 2. Основи теорії стійкості руху та покою механічних систем.					
Тема 7. Основні поняття та визначення.	10	4		2	4
Тема 8. Лінеаризація диференційних рівнянь.	12	4		4	4
Тема 9. Теореми Ляпунова щодо стійкості за першим наближенням.	11	4		2	5
Тема 10. Теорема другого методу щодо стійкості руху.	10	4		2	4
Тема 11. Теорема Лагранжа щодо стійкості рівноваги консервативної системи.	8	4			4
Тема 12. Приклади аналізу стійкості руху.	12	4		4	4
Модульний контроль	2			2	
Разом за змістовним модулем 2	65	24		16	25
Усього годин	130	48		32	50
Індивідуальне завдання	20				20
Контрольний захід	2				
Усього годин	150	48		32	70

5. Теми семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		
2		

6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кільк. годин
	Разом	

7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кільк. год.
1	2	3
1	Коливання систем з одним ступенем вільності.	4
2	Власні коливання системи з двома ступенями вільності	2
3	Рішення ДРЧП. Континуальні коливальні системи.	4
4	Поздовжні коливання стержнів. Суперпозиція власних форм.	2
5	Коливання стержнів. Власні форми. Аналітичне рішення.	2
6	Коливання стержнів. Власні форми. Чисельне рішення ..	2
7	Лінеаризація диференційних рівнянь	4
8	Аналіз стійкості руху за допомогою алгебраїчного критерія Гурвіца.	2
9	Аналіз стійкості руху за допомогою критерія Вишнеградського	2
10	Аналіз стійкості руху за допомогою критерія Михайлова	4
11	Модульний контроль	4
	Разом	32

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кільк. годин
1	Вступ до дисципліни	4
2	Коливання систем з двома ступенями вільності.	4
3	Коливання систем з скінченною кількістю ступенів вільності..	4
4	Континуальні коливальні системи.	4
5	Круті коливання валів.	4
6	Згінні коливання балок.	5
7	Основні поняття та визначення теорії стійкості руху та покою механічних систем	4
8	Лінеаризація диференційних рівнянь.	4
9	Теорема Ляпунова щодо стійкості за першим наближенням.	5
10	Теорема другого методу щодо стійкості руху.	4
11	Теорема Лагранжа щодо стійкості рівноваги консервативної системи.	4
12	Приклади аналізу стійкості руху.	4
13	Індивідуальне завдання	20
	Разом	70

9. Індивідуальні завдання

РР «Аналіз стійкості руху робота».

10. Методи навчання

Проведення аудиторних лекцій, практичних занять, індивідуальні консультації, самостійна робота студентів за рекомендованими матеріалами, в тому числі-опублікованими кафедрою (методичні посібники та рекомендована література).

11. Методи контролю

Проведення поточного контролю, письмового модульного контролю, фінальний контроль у вигляді іспиту.

12. 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	12	0... 12
Робота на лабораторних	0...2	7	0...14
Модульний контроль	0... 14	1	0... 14
Змістовний модуль 2			
Робота на лекціях	0... 1	12	0... 12
Робота на практичних заняттях	0...2	7	0...14
Модульний контроль	0... 14	1	0... 14
Виконання та захист РР			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. Дискретні коливальні системи. Одномасова система. Приклади (маятник, підпружинена матеріальна точка). Динамічна рівновага системи. Поняття повертаючої сили.
2. Виведення рівняння малих пружних коливань одномасової системи без демпфування.
3. Рішення рівняння коливань одномасової системи без демпфування.. Періодичність коливань, перемішень, швидкостей, прискорень. Власна частота, період та амплітуда коливань, їх залежність від параметрів системи.
4. Явище резонансу на прикладі одномасової системи одномасової системи без демпфування.. Небезпечність резонансу механічних систем. Приклади.
5. Демпфування коливань, розсіяння енергії коливань. Рівняння коливань з урахуванням демпфування.
6. Рішення рівняння коливань з урахуванням демпфування.
7. Вплив демпфування на амплітуду коливань. Згасання коливань, декремент згасання.
8. Демпфування як засіб боротьби з резонансом коливальних систем. Природне демпфування, фактори (сухе та рідке тертя), в'язкість основних конструкційних матеріалів. Різниця між демпферами та амортизаторами. Приклади (двері в метро, стійка шасі літака).
9. Багатомасові (скінченомерні, дискретні) механічні системи в загальних координатах.
10. Характеристична матриця багатомасової системи.
11. Матрична форма задачі про власні значення. Власні вектори та власні значення.
12. Модель промислового робота як багатомасова система. Особливість – зміна конфігурації, а також інерційних, пружних та геометричних параметрів. Можливість параметричних коливань (автоколивань).

13. Коливальні системи із розподіленими параметрами (континуальні). Стержневі системи. Малі коливання. Виведення рівняння поздовжніх коливань стержня.
14. Загальне рішення рівняння поздовжніх коливань стержня в власних формах.
15. Рівняння власних частот поздовжніх коливань стержня. Спектр власних частот.
16. Рішення рівняння поздовжніх коливань затиснутих стержнів з початковими кінематичними умовами в власних формах.
17. Рішення рівняння поздовжніх коливань стислих стержнів в власних формах. Залежність власних частот від характеру спірання стержня.
18. Виведення рівняння крутних коливань стержнів (вала).
19. Рішення рівняння крутних коливань в власних формах на прикладі вільного вала. Спектр власних частот.
20. Рішення рівняння крутних коливань у разі змушених коливань на прикладі вала з дисками на кінцях.
21. Умови ортогональності та нормування на прикладі вільного вала.
22. Виведення рівняння поперечних коливань стержнів.
23. Граничні умови для рівняння поперечних коливань.
24. Рішення рівняння в власних формах поперечних коливань стержнів. Спектр власних частот.
25. Ортогональність власних форм поперечних коливань стержнів.
26. Нормування функцій форми поперечних коливань.
27. Явище стійкості (нестійкості) руху. Предмет та задачі теорії стійкості руху.
28. Загальний вид рівнянь руху. Отримання рівнянь вимушеного руху. Фазові координати.
29. Стійкість невимушеного руху. Асимптотична стійкість. Нестійкість руху.
30. Побудова рівняння вимушеного руху фізичного маятника.
31. Побудова рівнянь вимушеного руху тіла з нерухомою точкою.
32. Поняття лінеаризації. Процедура лінеаризації диференціальних рівнянь.
33. Побудова лінеаризованих рівнянь руху для нелінійної пружини.
34. Поняття стійкості лінійних систем диференціальних рівнянь. Отримання характеристичного полінома. Зв'язок корнів полінома з стійкістю системи диференціальних рівнянь.
35. Аналіз стійкості диференціального рівняння другого порядку за часом.
36. Теорема Ляпунова про стійкість за першим наближенням (без доказу).
37. Функції Ляпунова. Властивості функцій. Надати приклади.
38. Знако- визначені функції. Знако- постійні функції. Знако- змінні функції. Дати визначення та надати приклади.
39. Розклад функції Ляпунова в ряд Маклорена та аналіз геометричних властивостей поверхні в разі двох координат.
40. Доказ теореми Ляпунова про стійкість невимушеного руху.
41. Використання критерія Сільвестра для визначення знаковизначеності функції Ляпунова.
42. Виконати аналіз стійкості руху тіла з однією нерухомою точкою за другим методом Ляпунова.
43. Доказ теореми Лагранжа щодо стійкості покою (рівноваги) тіла.
44. Визначити умови рівноваги зворотного маятника.
45. Критерій стійкості лінійних систем Гурвіца
46. Аналіз стійкості руху одноосного гіростабілізатора за допомогою критерія Гурвіца.
47. Критерій стійкості лінійних систем Вишнеградського.
48. Аналіз стійкості руху двигуна з регулятором Уатта за допомогою критерія Вишнеградського.
49. Частотний критерій стійкості лінійних систем Михайлова.

Необхідний обсяг умінь для одержання позитивної оцінки:

1. Вирішувати рівняння коливань одномасової системи без демпфування та з демпфуванням.
 2. Визначати власну частота, період та амплітуда коливань в залежності від параметрів одномасової системи.
 3. Визначати загальне рішення рівняння поздовжніх коливань стержня в власних формах.
 4. Визначати спектр власних частот поздовжніх коливань стержня.
 5. Визначати рішення рівняння крутих коливань в власних формах на прикладі вільного вала.
 6. Визначати спектр власних частот крутих коливань вільного вала.
 7. Визначати рішення рівняння крутих коливань у разі змушених
 8. Виведення рівняння поперечних коливань стержнів.
 9. Граничні умови для рівняння поперечних коливань.
 10. Визначати рішення рівняння поперечних коливань стержнів в власних формах.
 11. Визначати спектр власних частот поперечних коливань стержнів
 12. Виконувати нормування функцій форми поперечних коливань
 13. Проводити лінеаризацію диференціальних рівнянь.
 14. Будувати характеристичний поліном для диференціального рівняння.
 15. Виконувати аналіз стійкості за першим наближенням системи диференціальних рівнянь виду $\dot{x} = -y + ax^3$, $\dot{y} = x + ay^3$, $a = const$.
 16. Використовувати критерій Сільвестра для знаковизначеності функції виду $V = 1 - \cos(x_1 - x_2) + \sin^2 x_1$.
 17. Визначити залежності для побудови кривої Михайлова для диференціального рівняння виду $\frac{d^4 y}{dt^4} + 2.2 \frac{d^3 y}{dt^3} - 1.47 \frac{d^2 y}{dt^2} + 8 \frac{dy}{dt} + 3y = 0$
 18. Визначити стійкість руху, описаного рівнянням виду $\frac{d^4 y}{dt^4} + 11 \frac{d^3 y}{dt^3} - 18 \frac{d^2 y}{dt^2} + 28 \frac{dy}{dt} - 32y = 0$
- за допомогою критерію Гурвіца

12.3 Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

Задовільно (60-74). Мати мінімум знань та умінь. Знати основні поняття та закони теорії коливань. Вміти самостійно формулювати рівняння коливань для стержнів заданого розміру, виконаних з даного матеріалу. Вміти за допомогою викладача визначати спектр коливань. Вміти за допомогою викладача виконати лінеаризацію диференціального рівняння. Знати властивості функції Ляпунова. Знати критерії стійкості диференціальних рівнянь та за допомогою викладача визначати стійкість руху простих механічних систем.

Добре (75 - 89). Самостійно формулювати та вирішувати рівняння коливань одно масової системи. За допомогою викладача формулювати системи рівнянь коливань багатомасової системи. самостійно формулювати рівняння коливань та граничні і початкові умови. Самостійно лінеаризувати рівняння руху. аналізувати стійкість руху лінійних систем.

Відмінно (90 - 100). Повно знати основний матеріал курсу. Вміти самостійно:

- розшукувати та усвідомлювати теоретичний матеріал з літературних джерел;
- формулювати та вирішувати задачі коливань механічних багатомасових та стержневих систем за допомогою MathCAD;
- формулювати та вирішувати задачі стійкості руху;

– 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. Василенко М.В., Алексейчук О.М.- Теорія коливань і стійкості руху.- Київ: Вища школа, 2004.- 525 с. ISBN 966-624-105-4.
2. Гаращенко Ф.Г., Матвієнко В.Т., Харченко І.І. Диференціальні рівняння для інформатиків. – К.: Видавничо- поліграфічний центр «Київський університет», 2008.- 352 с. ISBN 966-594-883-0.

Допоміжна

1. Fu R.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing < Vision and Intelligence.- McGraw- Hill, 1987, 594 p..

15. Інформаційні ресурси

<https://education.khai.edu/department/202>

<https://k202.tilda.ws/>