

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Направление подготовки/специальность: 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Наименование образовательной программы: Мехатроника и робототехника

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная


Рабочая программа дисциплины
ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Обязательная
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.О.34
Трудоемкость в зачетных единицах:	7 семестр - 4;
Часов (всего) по учебному плану:	144 часа
Лекции	7 семестр - 32 часа;
Практические занятия	7 семестр - 16 часов;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	7 семестр - 2 часа;
Самостоятельная работа	7 семестр - 93,5 часа;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая: Контрольная работа Расчетно-графическая работа Домашнее задание	
Промежуточная аттестация:	
Экзамен	7 семестр - 0,5 часа;

Москва 2023

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Панкратьева Г.В.
	Идентификатор	Rf2a4c31b-PankratyevaGV-74e45d

Г.В. Панкратьева

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Адамов Б.И.
	Идентификатор	R2db20bbf-AdamovBI-4e0d2620

Б.И. Адамов

Заведующий выпускающей
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Меркурьев И.В.
	Идентификатор	Rd52c763c-MerkuryevIV-1e4a883c

И.В. Меркурьев

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины: Изучение эффективных прикладных методов и овладение основными алгоритмами исследования колебаний. Выработка навыков практического использования методов, предназначенных для математического моделирования сложных технических систем

Задачи дисциплины

- изучение основных понятий, концепций и алгоритмов теории колебаний;
- овладение важнейшими методами решения прикладных задач;
- формирование устойчивых навыков по применению арсенала прикладных методов теории колебаний;
- ознакомление с историей и логикой развития данной дисциплины.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности	ИД-15 _{ОПК-1} Применяет аппарат теории колебаний, в том числе асимптотические методы, для исследования и моделирования динамики мехатронных систем	знать: - теоретические основы теории колебаний и используемого в ней вспомогательного математического аппарата; порядок применения теоретического аппарата в важнейших практических приложениях; - принципы построения математических моделей мехатронных систем; основные понятия и алгоритмы теории колебаний и условия, при соблюдении которых их применение является оправданным. уметь: - использовать прикладные методы теории колебаний для исследования математических моделей мехатронных систем; самостоятельно разрабатывать алгоритмы решения практических задач; решать типовые задачи по разделу «Динамика стационарных систем»; - грамотно применять прикладные методы теории колебаний при анализе математических моделей мехатронных систем; использовать их в технических приложениях; решать типовые задачи по разделу «Динамика нестационарных систем».

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Мехатроника и робототехника (далее – ОПОП), направления подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать основы линейной алгебры, математического анализа, теории множеств и математической логики
- знать основные понятия и концепции теоретической механики, важнейшие теоремы механики и их следствия, принципы построения математических моделей робототехнических и мехатронных систем
- знать методы исследования равновесия и движения робототехнических и мехатронных систем
- уметь составлять уравнения равновесия и движения робототехнических и мехатронных систем
- уметь применять математические методы в ходе решения практических задач
- уметь пользоваться современным математическим обеспечением для инженерных расчётов
- уметь осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часа.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания
				Контактная работа							СР			
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль	
КПР	ГК	ИККП	ТК											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Влияние структуры сил на колебания мехатронных систем	54	7	16	-	8	-	-	-	-	-	30	-	<p><u>Подготовка расчетных заданий:</u> Построение области ограниченности малых колебаний системы с непотенциальными позиционными силами. Зоны дивергенции, флаттера и ограниченности колебаний. Исследование структуры сил и анализ колебаний системы с двумя степенями свободы.</p> <p><u>Подготовка к контрольной работе:</u> Решение задач по темам: "Изучение поведения систем под действием потенциальных и непотенциальных позиционных, диссипативных и гироскопических скоростных сил. Определение вида решения и анализ устойчивости линейных уравнений колебаний при произвольной структуре действующих сил".</p> <p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Повторение материалов лекций и практических занятий по темам: "Потенциальные и непотенциальные позиционные силы, диссипативные и гироскопические скоростные силы. Необходимые и достаточные условия ограниченности решений линейной системы. Гироскопические и циркулярные системы. Гироскопическая стабилизация, временный</p>
1.1	Динамика линейных систем с постоянными коэффициентами	54		16	-	8	-	-	-	-	-	-	30	

													характер гироскопической стабилизации. Построение области ограниченности малых колебаний системы с непотенциальными позиционными силами. Зоны дивергенции, флаттера и ограниченности колебаний". <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [3], 150-170 [5], 216-222 [7], 171-186
2	Методы анализа нестационарных мехатронных систем. Параметрические колебания	54	16	-	8	-	-	-	-	-	30	-	<u>Подготовка домашнего задания:</u> Решение индивидуальной домашней задачи по разделу: "Системы с периодическими коэффициентами. Уравнение Матье". <u>Подготовка к контрольной работе:</u> Решение задач по теме: "Приводимые линейные системы с переменными коэффициентами. Системы Гейзенберга - Лакса". Разбор задач, решённых на аудиторных занятиях. <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Повторение материалов лекций и практических занятий по темам: "Системы с переменными коэффициентами. Приводимость к системе с постоянными коэффициентами. Системы Гейзенберга-Лакса. Системы с периодическими коэффициентами, матрица монодромии. Уравнение Матье. Диаграмма Айнса-Стретта". <u>Изучение материалов литературных источников:</u>
2.1	Динамика линейных систем с периодическими коэффициентами	54	16	-	8	-	-	-	-	-	30	-	[1], 22-28 [2], 21-29 [4], 74-83 [6], 103-106 [8], 108-124
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	Всего за семестр	144.0	32	-	16	-	2	-	-	0.5	60	33.5	

	Итого за семестр	144.0		32	-	16	2	-	0.5	93.5	
--	------------------	-------	--	----	---	----	---	---	-----	------	--

Примечание: Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

3.2 Краткое содержание разделов

1. Влияние структуры сил на колебания мехатронных систем

1.1. Динамика линейных систем с постоянными коэффициентами

Консервативные позиционные силы. Гироскопические силы. Диссипативные силы. Неконсервативные позиционные силы. Инвариантное представление характеристического уравнения системы с двумя степенями свободы. Определение устойчивости по А.М.Ляпунову невозмущенных решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Необходимые и достаточные условия ограниченности решений линейной системы, достаточные условия ограниченности решений линейной системы; условия Рауса – Гурвица, Лъенара – Шипара. Консервативные позиционные силы. Положительный и отрицательный индекс инерции квадратичной формы. Условия устойчивости и неустойчивости малых колебаний, возможности гироскопической стабилизации. Наличие нечетного числа корней характеристического уравнения как индекс неустойчивости консервативной системы. Анализ траекторий корней характеристического уравнения консервативной системы с двумя степенями свободы при наличии гироскопических сил. Анализ траекторий корней характеристического уравнения при добавлении диссипативных сил. Временный характер гироскопической стабилизации. Пример стабилизации неустойчивого положения равновесия заряда в стационарном электрическом поле с помощью внешнего магнитного поля (гироскопических сил). Система с неконсервативными позиционными силами при отсутствии сил, зависящих от скорости. Исследование критического случая наличия кратных чисто мнимых корней. Построение области ограниченности малых колебаний системы с неконсервативными позиционными силами при наличии сил, зависящих от скорости. «Зонтик Уитни». Задача Циглера о нахождении критической следящей силы. Влияние диссипативной силы. Анализ траекторий корней характеристического уравнения неконсервативной системы с двумя степенями свободы при отсутствии сил, зависящих от скорости. Зоны дивергенции, флаттера и ограниченности колебаний. Анализ траекторий корней характеристического уравнения системы с двумя степенями свободы при наличии диссипативных, гироскопических и неконсервативных позиционных сил, но при отсутствии консервативных позиционных сил. Функция Лагранжа для консервативной системы с двумя степенями свободы при наличии гироскопических сил. Соответствующие обобщенные импульсы, полная энергия, уравнения Гамильтона. Первые интегралы системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Гамильтониан как пример первого интеграла. Инвариантные гиперплоскости в пространстве состояний консервативной системы с гироскопическими силами. Матричные квадратные уравнения. Теорема Виета для матричного квадратного уравнения. Условия существования инвариантных плоскостей. Прецессионная и нутационная инвариантные плоскости. Ограничения полной энергии на инвариантные плоскости. Прецессионная теория малых колебаний гироскопических систем. Прецессионная теория движения гироскопа в кардановом подвесе.

2. Методы анализа нестационарных мехатронных систем. Параметрические колебания

2.1. Динамика линейных систем с периодическими коэффициентами

Системы с переменными коэффициентами. Теорема Еругина. Пример системы Гейзенберга-Лакса. Нахождение фазового объема для систем с постоянными и переменными коэффициентами. Теорема Флоке. Системы с периодическими коэффициентами. Теорема Ляпунова. Системы с периодическими коэффициентами. Матрица монодромии. Мультипликаторы. Критерий существования периодического и антипериодического решений системы с периодическими коэффициентами. Исследование решений системы второго порядка с периодическими коэффициентами. Уравнение Матъе. Диаграмма Айнса-Стретта. Асимптотическое исследование параметрически возмущаемой системы с

диссипацией. Лемма Гронуолла – Беллмана. Системы с почти постоянной матрицей. Приближенное решение уравнения Матье. Понятие бифуркации. Бифуркация Андронова – Хопфа. Возникновение (мягкая потеря устойчивости) и исчезновение (жёсткая потеря устойчивости) предельного цикла. Проблема разрешимости неоднородных уравнений. Теорема Фредгольма в случае конечномерного пространства. Квазилинейные системы с малым параметром. Гомологическое уравнение. Метод усреднения. Применение метода усреднения для нахождения средней угловой скорости вращения аэродинамического маятника. Кинематика аэродинамического маятника. Аэродинамические силы: боковая (подъемная) и сила лобового сопротивления. Уравнение динамики аэродинамического маятника. Бифуркационное условие разгона маятника. Полярная диаграмма линий нулевого момента сил. Методы асимптотического исследования систем дифференциальных уравнений. Метод малого параметра Пуанкаре. Построение первого приближения решения уравнения Дуффинга.

3.3. Темы практических занятий

1. Структура сил в линейных системах с постоянными коэффициентами. Свойства сил. Системы с гироскопическими и консервативными силами. Условие гироскопической стабилизации.
2. Контрольная работа «Определение вида решения и анализ устойчивости линейных уравнений колебаний при произвольной структуре действующих сил».
3. Волчок Лагранжа. Разрушение гироскопической стабилизации диссипативными силами. Выдача расчётного задания.
4. Системы с консервативными и позиционными неконсервативными силами. Области колебательной и экспоненциальной неустойчивости. Влияние диссипативных сил.
5. Линейные системы с переменными коэффициентами. Приводимые системы. Системы Гейзенберга-Лакса.
6. Контрольная работа «Нестационарные приводимые линейные системы».
7. Параметрические колебания. Параметрический резонанс. Уравнение Матье. Диаграмма Айнса-Стретта. Маятник Капицы. Выдача ИДЗ.
8. Колебания системы с сухим трением. Решение методом усреднения и методом припасовывания.

3.4. Темы лабораторных работ не предусмотрено

3.5 Консультации

3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ Курсовой проект/ работа не предусмотрены

3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)		Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	
Знать:				
принципы построения математических моделей мехатронных систем; основные понятия и алгоритмы теории колебаний и условия, при соблюдении которых их применение является оправданным	ИД-15 _{ОПК-1}	+		Расчетно-графическая работа/Исследование структуры действующих сил и анализ колебаний системы с двумя степенями свободы Контрольная работа/Определение вида решения и анализ устойчивости линейных уравнений колебаний при произвольной структуре действующих сил
теоретические основы теории колебаний и используемого в ней вспомогательного математического аппарата; порядок применения теоретического аппарата в важнейших практических приложениях	ИД-15 _{ОПК-1}		+	Домашнее задание/Параметрические колебания. Уравнение Матье Контрольная работа/Приводимые нестационарные линейные системы Гейзенберга-Лакса
Уметь:				
грамотно применять прикладные методы теории колебаний при анализе математических моделей мехатронных систем; использовать их в технических приложениях; решать типовые задачи по разделу «Динамика нестационарных систем»	ИД-15 _{ОПК-1}		+	Домашнее задание/Параметрические колебания. Уравнение Матье Контрольная работа/Приводимые нестационарные линейные системы Гейзенберга-Лакса
использовать прикладные методы теории колебаний для исследования математических моделей мехатронных систем; самостоятельно разрабатывать алгоритмы решения практических задач; решать типовые задачи по разделу «Динамика стационарных систем»	ИД-15 _{ОПК-1}	+		Расчетно-графическая работа/Исследование структуры действующих сил и анализ колебаний системы с двумя степенями свободы Контрольная работа/Определение вида

				решения и анализ устойчивости линейных уравнений колебаний при произвольной структуре действующих сил
--	--	--	--	---

4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)

4.1. Текущий контроль успеваемости

7 семестр

Форма реализации: Письменная работа

1. Исследование структуры действующих сил и анализ колебаний системы с двумя степенями свободы (Расчетно-графическая работа)
2. Определение вида решения и анализ устойчивости линейных уравнений колебаний при произвольной структуре действующих сил (Контрольная работа)
3. Параметрические колебания. Уравнение Матье (Домашнее задание)
4. Приводимые нестационарные линейные системы Гейзенберга-Лакса (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине

Экзамен (Семестр №7)

Итоговая оценка по курсу определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и экзаменационной составляющих

В диплом выставляется оценка за 7 семестр.

Примечание: Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Печатные и электронные издания:

1. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин . – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1956 . – 600 с.;
2. Журавлев, В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов ; отв. ред. А. Ю. Ишлинский ; Акад. наук СССР. Ин-т проблем механики . – М. : Наука, 1985 . – 125 с.;
3. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Д. Р. Меркин . – 4-е изд., стереотип . – СПб. : Лань-Пресс, 2003 . – 304 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература) . - ISBN 5-8114-0313-5 .;
4. Новожилов, И. В. Фракционный анализ / И. В. Новожилов . – М. : Изд-во МГУ, 1991 . – 190 с. - ISBN 5-211-01564-9 .;
5. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний : Учебное пособие для вузов / Я. Г. Пановко . – 3-е изд., перераб . – М. : Наука, 1991 . – 256 с. - ISBN 5-7325-0096-0 .;
6. Горелик Г. С.- "Колебания и волны", (3-е изд.: под ред.), Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2007 - (656 с.)
https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2167;
7. Журавлев В. Ф.- "Основы теоретической механики", Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2008 - (304 с.)
https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=47559;

8. Каленова В. И., Морозов В. М. - "Линейные нестационарные системы и их приложения к задачам механики", Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2010 - (208 с.)
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59579.

5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Windows / Операционная система семейства Linux;
4. Майнд Видеоконференции;
5. Антиплагиат ВУЗ;
6. Acrobat Reader.

5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
5. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>
6. Федеральный портал "Российское образование" - <http://www.edu.ru>

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	С-215, Учебная аудитория	стол, стул, доска меловая
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Б-415, Учебная аудитория	кресло рабочее, стол преподавателя, стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	С-215, Учебная аудитория	стол, стул, доска меловая
	С-213, Учебная аудитория	стол, стул, доска меловая
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	С-215, Учебная аудитория	стол, стул, доска меловая
	С-213, Учебная аудитория	стол, стул, доска меловая
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Б-411, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол, стул, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная
Помещения для	НТБ-303,	стол компьютерный, стул, стол

самостоятельной работы	Компьютерный читальный зал	письменный, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер, кондиционер
	С-200, Компьютерный класс каф. "РМДиПМ"	стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный
Помещения для консультирования	С-208/2, Кабинет сотрудников	стол, стул, шкаф, компьютер персональный, принтер
	С-214, Кабинет сотрудников	стол, стул, компьютер персональный, принтер
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	С-114/1, Массажная	

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Прикладные методы теории колебаний

(название дисциплины)

7 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Определение вида решения и анализ устойчивости линейных уравнений колебаний при произвольной структуре действующих сил (Контрольная работа)
- КМ-2 Исследование структуры действующих сил и анализ колебаний системы с двумя степенями свободы (Расчетно-графическая работа)
- КМ-3 Приводимые нестационарные линейные системы Гейзенберга-Лакса (Контрольная работа)
- КМ-4 Параметрические колебания. Уравнение Матье (Домашнее задание)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	15
1	Влияние структуры сил на колебания мехатронных систем					
1.1	Динамика линейных систем с постоянными коэффициентами		+	+		
2	Методы анализа нестационарных мехатронных систем. Параметрические колебания					
2.1	Динамика линейных систем с периодическими коэффициентами				+	+
Вес КМ, %:			25	25	30	20