

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Минцаев Магомед Шавагович

Должность: Ректор

Дата подписания: 31.06.2026 14:37:05

Уникальный программный ключ:

236bcc35c296f119d6aafdc22836b21db52dbc07971e8686fa5825f9fa4304cc

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ГРОЗНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

имени академика М.Д. Миллионщикова

УТВЕРЖДАЮ



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

ДИСЦИПЛИНЫ

**«Математическое моделирование и анализ нелинейных
робототехнических систем»**

Направление подготовки

15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Направленность (профиль)

«Робототехнические системы автоматизированного управления»

Квалификация

Магистр

Год начала подготовки 2026

Грозный – 2026

1. Цели и задачи дисциплины

Цель: Формирование у магистрантов компетенций по разработке математических моделей нелинейных робототехнических систем (на примере промышленных манипуляторов KUKA), их анализу и имитационному моделированию с использованием современных САЕ-средств (MATLAB/Simulink).

Задачи:

- Освоение методов кинематического и динамического анализа манипуляционных роботов.
- Формирование навыков построения математических моделей в среде MATLAB/Simulink с использованием пакетов Robotic System Toolbox, Simscape Multibody.
- Развитие способности анализировать нелинейные эффекты (особые положения, динамические связи) и выбирать методы их компенсации.
- Приобретение опыта верификации моделей и интерпретации результатов моделирования.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Математическое моделирование и анализ нелинейных робототехнических систем» относится к блоку 1 (обязательная часть). Предшествующими дисциплинами, формирующими начальные знания, являются дисциплины «Механика и динамика робототехнических систем» (Б1.О.03), «Основы научных исследований» (Б1.О.04). Последующими дисциплинами являются: «Цифровое моделирование производственных систем» (Б1.В.09), «Интеллектуальные системы и машинное обучение в робототехнике» (Б1.В.11).

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплинам (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

3. Требования к результатам освоения дисциплины

Таблица 1

Код компетенции	Наименование компетенции	Код индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине
Общепрофессиональные			
ОПК-5	Способен разрабатывать аналитические и численные методы при создании математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов	ОПК-5.1	Знать: математический аппарат для описания кинематики и динамики манипуляторов (матрицы поворота, однородные преобразования, уравнения Лагранжа, метод Ньютона-Эйлера)
		ОПК-5.2	Уметь: разрабатывать аналитические и численные методы решения прямой и обратной задачи кинематики для манипулятора с 6 степенями свободы (на примере KUKA KR 5)
		ОПК-5.3	Владеть: навыками построения динамических моделей в среде Simscape Multibody и их верификации
Профессиональные			
ПК-1	Способен проводить математическое моделирование процессов, оборудования, средств и систем автоматизации с использованием современных технологий научных исследований	ПК-1.1	Знать: методы планирования траекторий в пространстве суставов и декартовом пространстве (полиномиальные траектории, LSPB, траектории с ограничениями)
		ПК-1.2	Уметь: проводить имитационное моделирование движения манипулятора в Robotic System Toolbox, анализировать рассогласование между заданной и реальной траекторией
		ПК-1.3	Владеть: методами анализа особых положений (сингулярностей) манипулятора и способами их обхода

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Таблица 2

Вид учебной работы	Всего часов/з.е.	Семестр 2
Контактная работа (всего)	84/2,33	84/2,33
Лекции (Л)	28/0,8	28/0,8
Лабораторные работы (ЛР)	—	—
Практические занятия (ПЗ)	56/1,53	56/1,53
Самостоятельная работа (СРС)	60/1,67	60/1,67
Контроль (экзамен + КП)	36/1	36/1
Общая трудоемкость	180/5	180/5

Форма промежуточной аттестации: экзамен, курсовой проект (КП)

5.1. Разделы дисциплины и виды учебных занятий

Таблица 3

№ п/п	Наименование раздела	Лекции (час)	Практические занятия (час)	СРС (час)	Всего
1	Кинематика манипуляторов. Метод Денавита-Хартенберга	6	12	12	30
2	Обратная задача кинематики. Аналитические и численные методы	6	12	12	30
3	Динамика манипуляторов. Уравнения Эйлера-Лагранжа	6	12	12	30
4	Планирование траекторий. Методы полиномиальной интерполяции	5	10	12	27
5	Моделирование в среде MATLAB/Simulink. Robotic System Toolbox	5	10	12	27
Итого		28	56	60	144
Контроль (экзамен + КП)					36

Всего по дисциплине					180
---------------------	--	--	--	--	-----

5.2. Содержание лекционных занятий

Таблица 4

№ раздела	Наименование	Содержание лекций
1	Кинематика манипуляторов	Системы координат. Матрицы поворота и однородные преобразования. Параметры Денавита-Хартенберга (DH). Прямая задача кинематики для манипулятора KUKA KR 5 (6 DOF). Источник: KUKA KR 5 — реальная промышленная модель с грузоподъёмностью 5 кг, вылетом 850 мм (данные из открытой спецификации KUKA Robotics).
2	Обратная задача кинематики	Постановка задачи. Аналитическое решение для манипуляторов со сферическим запястьем (метод разделения переменных Пайпера). Численные методы: метод Ньютона-Рафсона, градиентные методы. Проблема множественности решений и выбора оптимальной конфигурации («локоть вверх/вниз», «запястье флип»).
3	Динамика манипуляторов	Уравнения Эйлера-Лагранжа. Вывод матрицы инерции, центробежных и кориолисовых членов, вектора гравитационных моментов. Уравнение динамики в форме $M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = \tau$. Метод рекурсивного вычисления Ньютона-Эйлера (вычислительная сложность $O(n)$ против $O(n^4)$ для метода Лагранжа).
4	Планирование траекторий	Траектории в пространстве суставов: полиномы 3-го и 5-го порядка, LSPB (Linear Segment with Parabolic Blends). Траектории в декартовом пространстве: линейная интерполяция с ориентацией (кватернионы). Ограничения по скорости, ускорению и рывку (jerk).
5	Моделирование в MATLAB	Структура Robotic System Toolbox. Создание объекта-манипулятора (rigidBodyTree). Визуализация. Прямая и обратная кинематика встроенными функциями. Интеграция с Simulink (блок Simulink - General - MATLAB System). Основы Simscape Multibody: импорт CAD-моделей (формат STEP).

5.3. Практические занятия

Таблица 5

№ раздела	Тематика практических занятий	Форма проведения	Используемое ПО
1	Расчёт прямой задачи кинематики для 3-звенного манипулятора	Индивидуальные расчёты у доски + проверка в MATLAB	MATLAB / Octave
2	Реализация численного метода решения обратной задачи кинематики в MATLAB	Программирование в среде MATLAB	MATLAB
3	Вывод уравнения динамики для двухзвенного манипулятора и его моделирование в Simulink	Работа в парах + компьютерный практикум	MATLAB + Simulink
4	Планирование LSPB-траектории для перемещения схвата между двумя точками	Индивидуальная работа в MATLAB	MATLAB
5	Построение полной модели манипулятора KUKA KR 5 в Robotic System Toolbox и Simscape Multibody	Групповая работа (3-4 чел.) + защита отчёта	MATLAB + Simulink + Robotic System Toolbox + Simscape Multibody

6. Самостоятельная работа студентов

Таблица 6

№ п/п	Название раздела	Вид самостоятельной работы	Трудоёмкость (час)
1	Кинематика	Изучение метода Денавита-Хартенберга по литературе. Подготовка к защите лабораторного блока.	12
2	Обратная кинематика	Аналитический вывод решения для манипулятора KUKA по схеме Пайпера. Подготовка отчёта.	12
3	Динамика	Сравнительный анализ методов Лагранжа и Ньютона-Эйлера (реферат по научным статьям, например, из IEEE Xplore или Elibrary).	12
4	Траектории	Разработка скрипта для генерации LSPB-траектории с графиками положения, скорости и ускорения.	12
5	Моделирование	Выполнение курсового проекта: «Моделирование движения манипулятора KUKA KR 5 по заданной траектории с оценкой ошибок позиционирования».	12
Итого			60

7. Курсовой проект

Тематика курсовых проектов (на выбор или по заданию преподавателя):

1. Разработка имитационной модели манипулятора KUKA KR 5 в среде Simscape Multibody и верификация кинематических соотношений.
2. Сравнительный анализ методов решения обратной задачи кинематики (аналитический vs численный) для манипулятора с 6 DOF.
3. Исследование влияния сингулярных положений на точность позиционирования при движении по декартовой траектории.
4. Оптимизация траектории манипулятора по критерию минимума времени с учётом ограничений на скорость и ускорение.

Структура курсового проекта (по ГОСТ 2.105-95 ЕСКД):

- Титульный лист
- Задание
- Введение
- Глава 1. Аналитический обзор (математическая постановка задачи)
- Глава 2. Разработка модели (описание модели в MATLAB/Simulink)
- Глава 3. Результаты моделирования и их анализ (графики, таблицы, сравнение)
- Заключение (выводы, рекомендации)
- Список литературы
- Приложение (листинг программного кода)

Критерии оценки курсового проекта — см. раздел «ФОС».

7. Фонды оценочных средств

7.1. Вопросы на самоподготовку

1. Прямая задача кинематики для манипулятора KUKA KR 5. Построение таблицы параметров Денавита-Хартенберга. Расчёт однородных матриц преобразования для всех сочленений.
2. Численные методы решения обратной задачи кинематики. Реализация метода градиентного спуска в MATLAB. Сравнение с аналитическим методом Пайпера.
3. Планирование траекторий в пространстве суставов. Методы полиномиальной интерполяции 3-го и 5-го порядка. Построение LSPB-траекторий с ограничениями по скорости и ускорению.
4. Динамика манипуляторов. Вывод уравнений Эйлера-Лагранжа для двухзвенного манипулятора. Сравнение с рекурсивным методом Ньютона-Эйлера.

5. Имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink. Использование пакетов Robotic System Toolbox и Simscape Multibody для моделирования движения манипулятора.

6. Методы верификации математических моделей. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными (на примере KUKA KR 5). Критерии адекватности модели.

7. Оптимизация траекторий манипулятора. Методы одномерной и многомерной оптимизации для минимизации времени движения с учётом ограничений.

7.2. Вопросы к экзамену

1. **Прямая задача кинематики.** Метод Денавита-Хартенберга. Построение таблицы параметров для манипулятора с 6 степенями свободы (на примере KUKA KR 5). Расчёт однородной матрицы преобразования.

2. **Обратная задача кинематики.** Аналитические методы решения (метод Пайпера для манипуляторов со сферическим запястьем). Численные методы: метод Ньютона-Рафсона, градиентный спуск. Сравнительный анализ.

3. **Сингулярные положения манипуляторов.** Классификация сингулярностей (граничные, внутренние). Методы обнаружения и обхода сингулярностей на примере KUKA KR 5.

4. **Динамика манипуляторов.** Вывод уравнений Эйлера-Лагранжа. Физический смысл членов уравнения: матрица инерции, центробежные и кориолисовы силы, гравитационные моменты.

5. **Рекурсивный метод Ньютона-Эйлера.** Алгоритм вычисления динамических параметров. Вычислительная сложность $O(n)$ по сравнению с методом Лагранжа $O(n^4)$.

6. **Планирование траекторий в пространстве суставов.** Полиномы 3-го и 5-го порядка. LSPB-траектории (Linear Segment with Parabolic Blends). Параметры траекторий и их расчёт.

7. Планирование траекторий в декартовом пространстве. Линейная интерполяция с ориентацией. Использование кватернионов для описания ориентации схвата.

8. MATLAB Robotic System Toolbox. Структура объекта rigidBodyTree. Функции fkine (прямая кинематика), ikine (обратная кинематика), straj (декартовы траектории).

9. Моделирование в Simscape Multibody. Импорт CAD-моделей (формат STEP). Задание сочленений и ограничений. Симуляция динамики с учётом сил трения.

10.Верификация математических моделей. Методы сравнения с реальным экспериментом. Критерии адекватности: среднеквадратичная ошибка, максимальное отклонение.

11.Численное решение дифференциальных уравнений движения. Явные и неявные схемы. Использование встроенных солверов MATLAB (ode45, ode15s). Устойчивость и выбор шага интегрирования.

12.Метод возмущений для анализа нелинейных эффектов. Линеаризация динамических уравнений в окрестности рабочей точки. Анализ устойчивости.

13.Модели трения в сочленениях. Модель Кулона, модель Стрибека. Влияние трения на точность позиционирования и качество переходных процессов.

14.Калибровка кинематических параметров манипулятора. Метод наименьших квадратов. Использование лазерного трекера или vision-систем для сбора данных.

15.Сравнительный анализ сред моделирования. MATLAB/Simulink vs ROS/Gazebo vs Python (roboticstoolbox-python). Преимущества и ограничения каждой платформы.

7.3. Темы опросов на занятиях

1. Создание модели манипулятора в MATLAB. Использование объекта `rigidBodyTree`. Добавление звеньев и сочленений. Визуализация модели.
2. Программирование прямой задачи кинематики. Написание функций и скриптов для расчёта положения и ориентации схвата по заданным углам суставов.
3. Реализация численных методов решения обратной задачи кинематики. Отладка метода градиентного спуска. Анализ сходимости и выбор параметров (шаг, количество итераций).
4. Разработка М-файлов для расчёта траекторий. Построение полиномиальных и LSPB-траекторий. Визуализация графиков положения, скорости и ускорения.
5. Анализ рабочего пространства манипулятора. Построение достижимых точек с использованием прямой кинематики. Выявление мёртвых зон и сингулярностей.
6. Решение системы уравнений динамики методом Ньютона-Эйлера. Реализация рекурсивного алгоритма в MATLAB. Сравнение с методом Лагранжа.
7. Оптимизация траектории по времени. Использование встроенных функций оптимизации MATLAB (`fmincon`, `ga`). Учёт ограничений на скорость, ускорение и рывок (`jerk`).
8. Имитационное моделирование в Simulink. Построение блочной модели манипулятора. Интеграция с Robotic System Toolbox. Запуск симуляции и анализ результатов.
9. Импорт CAD-моделей в Simscape Multibody. Работа с форматом STEP. Настройка материалов, инерционных параметров и сочленений.
10. Верификация модели KUKA KR 5. Сравнение результатов моделирования с паспортными данными (грузоподъёмность, точность позиционирования, максимальная скорость).

7.4. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкалы оценивания

Таблица 7

Планируемые результаты освоения компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	Наименование оценочного средства
	0–41 баллов (не зачтено)	41–60 баллов (зачтено)
ОПК-5. Способен разрабатывать аналитические и численные методы при создании математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов		
Знает: математический аппарат для описания кинематики и динамики манипуляторов (матрицы поворота, однородные преобразования, уравнения Лагранжа, метод Ньютона-Эйлера)	Неполные, фрагментарные знания; не способен воспроизвести ключевые формулы	Сформированные систематические знания; правильно интерпретирует физический смысл уравнений и применяет их для анализа конкретных задач
Умеет: разрабатывать аналитические и численные методы решения прямой и обратной задачи кинематики для манипулятора с 6 степенями свободы (на примере KUKA KR 5)	Неполные умения; не способен самостоятельно построить ДН-таблицу или реализовать численный метод	Сформированные систематические умения; самостоятельно строит кинематическую модель, реализует численный метод в MATLAB и анализирует результаты
Владет: навыками построения динамических моделей в среде Simscape Multibody и их верификации	Неполные навыки; не способен импортировать CAD-модель или выполнить симуляцию	Сформированные систематические навыки; самостоятельно создаёт динамическую модель, проводит симуляцию и верифицирует её
ПК-1. Способен проводить математическое моделирование процессов, оборудования, средств и систем автоматизации с		

использованием современных технологий научных исследований		
Знает: методы планирования траекторий в пространстве суставов и декартовом пространстве (полиномиальные траектории, LSPB, траектории с ограничениями)	Неполные знания; не способен построить полиномиальную траекторию или обосновать выбор параметров	Сформированные систематические знания; самостоятельно рассчитывает параметры траектории и обосновывает выбор метода
Умеет: проводить имитационное моделирование движения манипулятора в Robotic System Toolbox, анализировать рассогласование между заданной и реальной траекторией	Неполные умения; не способен запустить симуляцию или интерпретировать результаты	Сформированные систематические умения; самостоятельно выполняет имитационное моделирование, анализирует ошибки и предлагает корректировки
Владеет: методами анализа особых положений (сингулярностей) манипулятора и способами их обхода	Неполные навыки; не способен обнаружить сингулярность или предложить способ её обхода	Сформированные систематические навыки; самостоятельно выявляет сингулярности и модифицирует траекторию для их обхода

8. Особенности реализации дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья

Для осуществления процедур текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся созданы фонды оценочных средств, адаптированные для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья и позволяющие оценить достижение ими запланированных в основной образовательной программе результатов обучения и уровень сформированности всех компетенций, заявленных в образовательной программе. Форма проведения текущей аттестации для студентов-инвалидов устанавливается с учетом индивидуальных психофизических особенностей (устно, письменно на бумаге, письменно на компьютере, в форме тестирования и т.п.). При тестировании для

слабовидящих студентов используются фонды оценочных средств с укрупненным шрифтом. На экзамен приглашается сопровождающий, который обеспечивает техническое сопровождение студенту. При необходимости студенту-инвалиду предоставляется дополнительное время для подготовки ответа на экзамене (или зачете). Обучающиеся с ограниченными возможностями здоровья и обучающиеся инвалиды обеспечиваются печатными и электронными образовательными ресурсами (программы, учебные пособия для самостоятельной работы и т.д.) в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

1) для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по зрению:

- для слепых: задания для выполнения на практических занятиях оформляются рельефно-точечным шрифтом Брайля, либо зачитываются ассистентом; письменные задания выполняются на бумаге рельефно-точечным шрифтом Брайля либо надиктовываются ассистенту; обучающимся для выполнения задания при необходимости предоставляется комплект письменных принадлежностей и бумага для письма рельефно-точечным шрифтом Брайля;

- для слабовидящих: обеспечивается индивидуальное равномерное освещение не менее 300 люкс; обучающимся для выполнения задания при необходимости предоставляется увеличивающее устройство; возможно также использование собственных увеличивающих устройств; задания для выполнения заданий оформляются увеличенным шрифтом;

2) для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по слуху:

- для глухих и слабослышащих: обеспечивается наличие звукоусиливающей аппаратуры коллективного пользования, при необходимости обучающимся предоставляется звукоусиливающая аппаратура индивидуального пользования; предоставляются услуги сурдопереводчика;

- для слепоглухих допускается присутствие ассистента, оказывающего услуги тифлосурдопереводчика (помимо требований, выполняемых соответственно для слепых и глухих);

3) для лиц с тяжелыми нарушениями речи, глухих, слабослышащих лекции и семинары, проводимые в устной форме, проводятся в письменной форме;

4) для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья, имеющих нарушения опорно-двигательного аппарата:

- для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата, нарушениями двигательных функций верхних конечностей или отсутствием верхних конечностей: письменные задания надиктовываются ассистенту; выполнение заданий (тестов, контрольных работ), проводимые в письменной форме, проводятся в устной форме путем опроса, беседы с обучающимся.

9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

9.1. Литература

1. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB®. — 2nd ed. — Springer, 2017. — 693 p. — DOI: 10.1007/978-3-319-54413-7.

2. Официальная документация к Robotic System Toolbox. Доступна в Springer Link (при наличии подписки вуза).

3. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. — Springer, 2009. — 632 p. — ISBN 978-1-84628-641-4.

4. Классический учебник по робототехнике, содержащий вывод всех основных уравнений.

5. Поршневу С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. — СПб.: Лань, 2011. — 736 с. — ISBN 978-5-8114-1118-8.

6. Есть в электронном доступе через ЭБС «Лань» (проверено по вашей РПД к MATLAB).

7. KUKA Robotics. KR 5 Specification Manual (официальная техническая документация). — KUKA Roboter GmbH, 2005. — Доступна по запросу через официального дистрибьютора в РФ.
8. Lynch K.M., Park F.C. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. — Cambridge University Press, 2017. — 544 p. — ISBN 978-1-107-15630-2. Содержит код на Python (библиотека `modern_robotics`).
9. MathWorks. Robotic System Toolbox Documentation. — www.mathworks.com/help/robotics (свободный доступ).

**Методические указания по освоению дисциплины
«Математическое моделирование и анализ нелинейных
робототехнических систем»**

1. Методические указания для обучающихся по планированию и организации времени, необходимого для освоения дисциплины

Изучение дисциплины рекомендуется начать с ознакомления с рабочей программой, её структурой и содержанием разделов, фондом оценочных средств, а также с учебно-методическим и информационным обеспечением. Дисциплина «Математическое моделирование и анализ нелинейных робототехнических систем» состоит из взаимосвязанных тем, обеспечивающих последовательное изучение материала: кинематика манипуляторов и метод Денавита-Хартенберга, обратная задача кинематики с аналитическими и численными методами решения, динамика манипуляторов на основе уравнений Эйлера-Лагранжа, планирование траекторий с использованием полиномиальной интерполяции, а также практическое моделирование в среде MATLAB и Simulink с применением пакетов Robotic System Toolbox и Simscape Multibody. Обучение по дисциплине осуществляется в нескольких формах: аудиторные занятия, включающие лекции и практические занятия в компьютерном классе; самостоятельная работа студента, которая охватывает подготовку к лекциям и практическим занятиям, выполнение домашних заданий по программированию в MATLAB,

подготовку к коллоквиуму и выполнение курсового проекта, а также индивидуальные консультации с преподавателем; и интерактивные формы проведения занятий, такие как коллоквиум, групповые обсуждения результатов моделирования, защита практических работ в форме мини-презентаций и дискуссии по выбору оптимальных методов моделирования для конкретных робототехнических задач. Учебный материал структурирован таким образом, что изучение дисциплины производится в тематической последовательности, при этом каждому практическому занятию и самостоятельному изучению материала предшествует лекция по данной теме. Обучающиеся самостоятельно проводят предварительную подготовку к занятию, принимают активное и творческое участие в обсуждении теоретических вопросов, разборе проблемных ситуаций и поисков путей их решения. Многие проблемы, изучаемые в курсе, носят дискуссионный характер, что предполагает интерактивный характер проведения занятий на конкретных примерах из области промышленной робототехники. Поскольку дисциплина предполагает активное использование MATLAB и Simulink для моделирования робототехнических систем, особое внимание следует уделить самостоятельной работе с программным обеспечением, рекомендуется сохранять все созданные скрипты и модели в отдельной папке с подробными комментариями для последующего использования при выполнении курсового проекта.

При изучении курса следует внимательно слушать и конспектировать материал, излагаемый на аудиторных занятиях. Для его понимания и качественного усвоения рекомендуется следующая последовательность действий: после окончания учебных занятий для закрепления материала необходимо просмотреть и обдумать текст лекции, прослушанной сегодня, разобрать рассмотренные примеры, уделяя этому десять-пятнадцать минут; при подготовке к лекции следующего дня следует повторить текст предыдущей лекции, подумать о том, какая может быть следующая тема, затрачивая на это пять-десять минут; в течение недели необходимо выбрать

время для работы с литературой в библиотеке, выделяя по одному часу, при этом для углублённого изучения рекомендуется ознакомление с научными статьями из IEEE Xplore по темам кинематики, динамики и планирования траекторий промышленных роботов; при подготовке к практическому занятию требуется повторить основные понятия по теме, изучить примеры программного кода MATLAB, а решая конкретную модельную ситуацию, предварительно понять, какой теоретический материал нужно использовать, наметить план решения и попробовать на его основе разработать и отладить программу в MATLAB. Перед выполнением лабораторных работ обязательно ознакомиться с документацией MathWorks по используемым пакетам, таким как Robotic System Toolbox и Simscape Multibody, а при возникновении ошибок в коде использовать встроенный отладчик MATLAB для пошагового анализа работы программы. Для выполнения курсового проекта рекомендуется начать работу не позднее чем за три недели до защиты, чтобы иметь достаточно времени для моделирования, анализа результатов и оформления отчёта по ГОСТ 2.105-95, при этом все результаты моделирования следует сохранять в виде графиков и таблиц для последующего включения в отчёт по курсовому проекту.

2. Методические указания по работе обучающихся во время проведения лекций

Лекции дают обучающимся систематизированные знания по дисциплине, концентрируют их внимание на наиболее сложных и важных вопросах. Лекции обычно излагаются в традиционном или в проблемном стиле. Для студентов магистратуры предпочтительным является проблемный стиль, поскольку он позволяет стимулировать активную познавательную деятельность обучающихся и их интерес к дисциплине, формировать творческое мышление, прибегать к противопоставлениям и сравнениям различных методов, например аналитических и численных методов решения обратной задачи кинематики, делать обобщения и классификации, активизировать внимание обучающихся путем постановки проблемных

вопросов, поощрять дискуссию по выбору оптимального метода моделирования для конкретной робототехнической задачи. Лекции сопровождаются демонстрацией математических выкладок и примеров программного кода в MATLAB, поэтому рекомендуется дублировать ключевые фрагменты кода в конспект с пометкой «листинг» для последующего использования на практических занятиях. Во время лекционных занятий рекомендуется вести конспектирование учебного материала, обращать внимание на формулировки и категории, раскрывающие суть того или иного явления или процессов, выводы и практические рекомендации.

Конспект лекции лучше подразделять на пункты, соблюдая красную строку. Этому в большой степени будут способствовать вопросы плана лекции, предложенные преподавателем. Следует обращать внимание на акценты, выводы, которые делает преподаватель, отмечая наиболее важные моменты в лекционном материале замечаниями «важно», «хорошо запомнить» и тому подобными. Можно делать это и с помощью разноцветных маркеров или ручек, подчеркивая термины и определения. Рекомендуется выделять красным цветом ключевые формулы и уравнения, синим цветом термины на английском языке, такие как forward kinematics, inverse kinematics, trajectory planning, а зелёным цветом названия функций MATLAB, например rigidBodyTree, ikine, fkine. Целесообразно разработать собственную систему сокращений, аббревиатур и символов, однако при дальнейшей работе с конспектом символы лучше заменить обычными словами для быстрого зрительного восприятия текста. Работая над конспектом лекций, необходимо использовать литературу, которую рекомендовал преподаватель. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть теоретическим материалом. Тематика лекций дается в рабочей программе дисциплины в разделе, содержащем описание содержания лекционных занятий.

3. Методические указания обучающимся по подготовке к практическим занятиям

На практических занятиях приветствуется активное участие в обсуждении конкретных ситуаций, способность на основе полученных знаний находить наиболее эффективные решения поставленных проблем, уметь находить полезный дополнительный материал по тематике занятий. В рамках данной дисциплины практические занятия проводятся в компьютерном классе и предполагают выполнение заданий по программированию в MATLAB, при этом каждое практическое занятие включает решение конкретной робототехнической задачи, такой как расчёт кинематики, планирование траектории или моделирование динамики. Студенту рекомендуется следующая схема подготовки к практическому занятию: ознакомиться с планом практического занятия, который отражает содержание предложенной темы и размещается в электронной информационно-образовательной среде университета не позднее чем за два дня до занятия; проработать конспект лекций по соответствующей теме, особенно те разделы, которые связаны с математическими выкладками, такими как матрицы поворота и уравнения Лагранжа; прочитать основную литературу, а для подготовки к занятиям, связанным с работой в MATLAB, рекомендуется заранее ознакомиться с документацией MathWorks по соответствующим пакетам; ознакомиться с примером программного кода, если он был предоставлен преподавателем, запустить код, убедиться в его работоспособности и проанализировать результат; при необходимости повторить синтаксис MATLAB, включая работу с массивами, циклами, функциями и отрисовку графиков.

В процессе подготовки к практическим занятиям необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной литературы. При всей полноте конспектирования лекции в ней невозможно изложить весь материал из-за лимита аудиторных часов. Поэтому самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной литературой,

материалами периодических изданий и Интернета является наиболее эффективным методом получения дополнительных знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала, формирует у студентов отношение к конкретной проблеме. Для углублённого изучения рекомендуется использовать официальную документацию MathWorks по Robotic System Toolbox и Simscape Multibody, научные статьи из IEEE Xplore при наличии доступа через вуз по методам моделирования манипуляторов, а также открытые лекции и курсы MIT и Stanford по робототехнике, доступные на YouTube и образовательных платформах. Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса. Для дисциплины по робототехнике в глоссарий рекомендуется включить такие термины, как прямая задача кинематики и её английский эквивалент Forward Kinematics, обратная задача кинематики или Inverse Kinematics, параметры Денавита-Хартенберга или Denavit-Hartenberg Parameters, уравнения Лагранжа или Lagrange Equations, планирование траекторий или Trajectory Planning, сингулярное положение или Singularity, рабочее пространство или Workspace. Далее необходимо ответить на вопросы плана практического занятия, выполнить домашнее задание, если оно предусмотрено, включающее подготовку кода или расчёт параметров, проработать тестовые задания и задачи из фонда оценочных средств дисциплины, а при затруднениях сформулировать вопросы к преподавателю. Результат такой работы должен проявиться в способности студента свободно ответить на теоретические вопросы практикума, выступать и участвовать в коллективном обсуждении вопросов изучаемой темы, самостоятельно написать и отладить программу в MATLAB для решения поставленной задачи, интерпретировать результаты моделирования и делать обоснованные выводы, а также правильно выполнять практические и иные задания, которые даются в фонде оценочных средств дисциплины.

4. Методические указания обучающимся по организации самостоятельной работы

Цель организации самостоятельной работы по дисциплине «Математическое моделирование и анализ нелинейных робототехнических систем» — это углубление и расширение знаний в области математического моделирования динамических систем, формирование навыка и интереса к самостоятельной познавательной деятельности в области робототехники, а также практическое освоение инструментов моделирования, таких как MATLAB и Simulink. Самостоятельная работа обучающихся является важнейшим видом освоения содержания дисциплины, подготовки к практическим занятиям и к экзамену. Сюда же относятся и самостоятельное углубленное изучение тем дисциплины, выполнение индивидуальных домашних заданий по программированию, подготовка курсового проекта. Самостоятельная работа представляет собой постоянно действующую систему, основу образовательного процесса и носит исследовательский характер, что послужит в будущем основанием для написания выпускной квалификационной работы, практического применения полученных знаний.

Организация самостоятельной работы обучающихся ориентируется на активные методы овладения знаниями, развитие творческих способностей, переход от поточного к индивидуализированному обучению, с учетом потребностей и возможностей личности. При выполнении самостоятельной работы по моделированию робототехнических систем рекомендуется вести электронный журнал экспериментов, в котором фиксируются параметры модели, такие как длины звеньев, массы и жёсткости, результаты расчётов, включая углы суставов, траектории и ошибки, а также выводы по каждому эксперименту. Этот журнал может стать основой для курсового проекта и выпускной квалификационной работы. Правильная организация самостоятельных учебных занятий, их систематичность, целесообразное планирование рабочего времени позволяет студентам развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивать

высокий уровень успеваемости в период обучения, получить навыки повышения профессионального уровня.

Примерный график самостоятельной работы на семестр включает ежедневное повторение лекционного материала в течение пятнадцати-двадцати минут, подготовку к практическим занятиям два раза в неделю по два-три часа, выполнение домашних заданий по мере их выдачи по одному-двум часам на каждое задание, подготовку к коллоквиуму один раз в семестр в течение четырёх-пяти часов и выполнение курсового проекта в течение последних четырёх недель семестра по два-три часа в день. По балльно-рейтинговой системе ГГНТУ самостоятельная работа оценивается в пятнадцать баллов и включает несколько видов работ. Подготовка к практическим занятиям включает изучение теории, написание и отладку кода MATLAB и оценивается по корректности выполнения задания, качеству кода и полноте защиты. Коллоквиум представляет собой устный опрос по разделам кинематики, обратной задачи кинематики и динамики и оценивается по полноте ответов, умению выводить формулы и объяснять физический смысл. Домашние задания включают решение задач по кинематике и динамике, разработку MATLAB-скриптов и оцениваются по правильности расчётов, отсутствию ошибок в коде и оформлению отчёта. Курсовой проект предполагает разработку модели манипулятора, проведение симуляции и оформление отчёта по критериям, описанным в фонде оценочных средств. Подготовка к экзамену включает повторение всех разделов и выполнение экзаменационных заданий.

Темы для самостоятельной работы прописаны в рабочей программе дисциплины в разделе, посвящённом самостоятельной работе студентов. Самостоятельная работа реализуется непосредственно в процессе аудиторных занятий на лекциях и практических занятиях, в контакте с преподавателем вне рамок расписания на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий, а также в библиотеке, дома, на

кафедре при выполнении обучающимся учебных и практических задач, в том числе с использованием компьютерной техники и лицензионного программного обеспечения. Эффективным средством осуществления обучающимся самостоятельной работы является электронная информационно-образовательная среда университета, которая обеспечивает доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин и практик, к изданиям электронных библиотечных систем, таким как IPR SMART и Digital Book, к цифровым версиям методических указаний и заданий для практических работ, к официальной документации MathWorks через ссылки в рабочей программе дисциплины, а также возможность задавать вопросы преподавателю через форум или электронную почту.

Для самостоятельного изучения рекомендуется использовать следующие ресурсы: MATLAB Online для выполнения заданий без установки MATLAB, доступный по адресу mathworks.com; бесплатную альтернативу MATLAB — библиотеку [robotics-toolbox-python](https://github.com/robotics-toolbox/python), доступную на GitHub; научные статьи по робототехнике из IEEE Xplore через доступ вуза; а также видеоматериалы для визуализации и реальных примеров на YouTube-каналах, таких как 3Blue1Brown и KUKA Robotics. Особое внимание следует уделить курсовому проекту, который является важнейшей формой самостоятельной работы в магистратуре, его цель — закрепление навыков математического моделирования на примере реальной робототехнической системы. Выполнение курсового проекта включает несколько этапов: выбор темы и получение задания на двенадцатой неделе семестра, изучение литературы и аналитический обзор на тринадцатой неделе, разработку математической модели на четырнадцатой неделе, реализацию модели в MATLAB и Simulink на пятнадцатой неделе, проведение симуляций и анализ результатов на шестнадцатой неделе, оформление отчёта по ГОСТ 2.105-95 на семнадцатой неделе и защиту проекта в форме презентации на пять-семь минут в зачётную неделю.

Составитель:

Ассистент кафедры «АТПП»

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Sadulaev A.A.-B.', written in a cursive style.

Садулаев А.А-В.

Согласовано:

И.о. зав. кафедрой «АТПП»

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Isaeva M.P.', written in a cursive style.

Исаева М.Р.

Директор ДУМР

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Magomaeva M.A.', written in a cursive style.

Магомаева М.А.