

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СОГЛАСОВАНО

Директор института магистратуры

И.В. Космачева

2023 г.



УТВЕРЖДАЮ

Директор института

С.С. Латышев

2023 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины

Математические основы робототехники

направление подготовки:

15.04.06 Мехатроника и робототехника

профиль:

Робототехника и искусственный интеллект

Квалификация

Магистр

Форма обучения

Очная


Институт **Технологического оборудования и машиностроения**

Кафедра: **Технологии машиностроения**

Белгород 2023

Рабочая программа составлена на основании требований:

- Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования 15.04.06 – Мехатроника и робототехника, утвержденного приказа Минобрнауки России от 14 августа 2020 г. № 1023
- учебного плана, утвержденного ученым советом БГТУ им. В.Г. Шухова в 2023 году.

Составитель (составители): д.т.н., проф.  (Л.А. Рыбак)
(ученая степень и звание, подпись) (инициалы, фамилия)


Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

« 15 » 05 2023 г., протокол № 11

Заведующий кафедрой: д.т.н., доц.  (Дююн Т.А.)
(ученая степень и звание, подпись) (инициалы, фамилия)

Рабочая программа одобрена методической комиссией института

« 22 » 05 2023 г., протокол № 6

Председатель  (Н.В. Куримов)
(ученая степень и звание, подпись) (инициалы, фамилия)

1. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Категория (группа) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания результата обучения по дисциплине
Общепрофессиональные компетенции	ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	ОПК- 1.1 Применяет естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	<p>Знать: основные понятия, термины, закономерности, естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.</p> <p>Уметь: применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.</p> <p>Владеть: навыками методов математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.</p>
	ОПК-13. Способен использовать основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.	ОПК-13.1 Составляет математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.	<p>Знать: основные понятия, термины, закономерности, математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.</p> <p>Уметь: применять на практике математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.</p> <p>Владеть: навыками составления математических моделей импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.</p>

		<p>ОПК-13.3 Применяет основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.</p>	<p>Знать: основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.</p> <p>Уметь: применять основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.</p> <p>Владеть: Навыками применения основных положений, законов и методов естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.</p>
--	--	---	--

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

1. Компетенция ОПК-1.1 Применяет естественнонаучные и общепрофессиональные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.

2. Компетенция ОПК-13.1 Составляет математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.

3. Компетенция ОПК-13.3 Применяет основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.

Данная компетенция формируется следующими дисциплинами.

Стадия	Наименования дисциплины ¹
1	Математические основы робототехники
2	Введение в теорию вероятности и математическую статистику
3	Выполнение, подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы

¹В таблице должны быть представлены все дисциплины и(или) практики, которые формируют компетенцию в соответствии с компетентностным планом. Дисциплины и(или) практики указывать в порядке их изучения по учебному плану.

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 9 зач. единицы, 324 часа.

Дисциплина реализуется в рамках практической подготовки²:

Форма промежуточной аттестации экзамен
(экзамен, дифференцированный зачет, зачет)

Вид учебной работы	Всего часов	Семестр № 1
Общая трудоемкость дисциплины, час	324	324
Контактная работа (аудиторные занятия), в т.ч.:	145	145
лекции	68	68
лабораторные		
практические	68	68
групповые консультации в период теоретического обучения и промежуточной аттестации ³	9	9
Самостоятельная работа студентов, включая индивидуальные и групповые консультации, в том числе:	179	179
Курсовой проект		
Курсовая работа		
Расчетно-графическое задания		
Индивидуальное домашнее задание		
Самостоятельная работа на подготовку к аудиторным занятиям (лекции, практические занятия, лабораторные занятия)		
Экзамен	1	1

² если дисциплина не реализуется в рамках практической подготовки – предложение убрать

³ включают предэкзаменационные консультации (при наличии), а также текущие консультации из расчета 10% от лекционных часов (приводятся к целому числу)

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1 Наименование тем, их содержание и объем

Курс 1 Семестр 1

№ п/п	Наименование раздела (краткое содержание)	Объем на тематический раздел по видам учебной нагрузки, час			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные Занятия	Самостоятельная работа
1	2	3	4	5	6
Раздел 1. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.					
	Исторические периоды теории управления. Типы проектирования систем управления. Системная интеграция. Определение проблемы. Прототип решения проблемы управления с помощью инверсии. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.	5	5	-	10
Раздел 2. Моделирование сигналов и систем непрерывного действия.					
	Сложность модели. Построение моделей. Структуры модели. Модели пространства состояний. Дифференциальные модели высокого порядка и модели с разностными уравнениями. Ошибки моделирования. Линеаризация. Линейные модели непрерывного времени. Преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа. Свойства и примеры. Передаточные функции. Стабильность передаточных функций. Импульсные и ступенчатые характеристики линейных систем с непрерывным временем. Полюса, нули и временные характеристики. Частотная характеристика. Преобразование Фурье. Часто встречающиеся модели. Ошибки моделирования для линейных систем. Границы ошибок моделирования.	5	5		12
Раздел 3. Анализ контуров управления SISO.					
	Структуры обратной связи. Функции номинальной чувствительности. Стабильность в замкнутом контуре на основе характеристического полинома. Частотная характеристика. Относительная стабильность: Пределы стабильности и пики чувствительности. Прочность.	5	5		12
Раздел 4. Классическое ПИД-регулирование и синтез SISO-контроллеров.					
	Эмпирическая настройка PID: Метод колебаний Циглера-Николса (Z-N). Методы, основанные на кривой реакции. Компенсаторы опережения и запаздывания. Полиномиальный подход. Синтез PI и PID с использованием назначения полюсов. Предсказатель	5	5		12

	Смита.				
Раздел 5. Фундаментальные ограничения в управлении SISO.					
	Ограничения погрешности модели. Структурные ограничения. Интегральные ограничения Боде на чувствительность. Интегральные ограничения на дополнительную чувствительность. Интегральное ограничение Пуассона на чувствительность. Интегральное ограничение Пуассона на дополнительную чувствительность.	5	5		12
Раздел 6. Архитектурные проблемы в системе управления SISO и ограничения.					
	Модели для детерминированных возмущений и ссылок. Принцип внутренней модели для возмущений. Принцип внутренней модели для отслеживания ссылок. Прямое управление. Каскадное управление. Завершение. Схема защиты от завершения. Насыщение состояния. Введение в модель прогнозирующего управления.	5	5		12
Раздел 7. Модели для систем дискретизации данных и цифрового управления.					
	Отбор проб. Реконструкция сигнала. Линейные модели с дискретным временем. Оператор сдвига и Z-преобразование. Дискретные передаточные функции. Дискретные модели дельта-области. Дискретное Дельта-преобразование. Дискретные передаточные функции. Передаточные функции и импульсные характеристики. Стабильность дискретной системы. Дискретные модели для дискретизированных непрерывных систем. Использование моделей непрерывного пространства состояний. Частотная характеристика систем с дискретизированными данными. Функции чувствительности к дискретному времени. Нули систем с дискретизированными данными	5	5		12
Раздел 8. Параметризация и управление контроллером SISO					
	Проектирование, основанное на оптимизации. Аффинная параметризация: Стабильный случай. Синтез ПИД с использованием аффинной параметризации. Аффинная параметризация для систем, имеющих временные задержки. Нежелательные полюса замкнутого контура. Аффинная параметризация: Нестабильный случай разомкнутого контура. Оптимальный Q (аффинный) синтез. Надежная схема управления с доверительными границами. Фундаментальные ограничения дешевого управления. Ограничения в частотной области	5	5		12
Раздел 9. Линейные модели пространства состояний.					
	Линейные модели пространства состояний с непрерывным временем. Преобразования подобия и передаточные функции. От передаточной функции к представлению пространства состояний. Управляемость и стабилизируемость. Наблюдаемость и обнаруживаемость. Каноническая декомпозиция. Отмена нулевого полюса и свойства системы.	5	5		12
Раздел 10. Синтез с помощью методов пространства состояний.					
	Назначение полюсов с помощью обратной связи по	5	5		18

	состоянию. Наблюдатели. Объединение обратной связи по состоянию с наблюдателем. Интерпретации передаточных функций. Переосмысление аффинной параметризации всех стабилизирующих контроллеров. Интерпретация принципа внутренней модели в пространстве состояний. Компромиссы в обратной связи по состоянию и наблюдателях. Работа с входными ограничениями в контексте обратной связи по оценке состояния				
Раздел 11. Введение в нелинейный					
	Контроль. Линейное управление нелинейной установкой. Переключаемые линейные контроллеры. Управление системами с плавными нелинейностями. Статические входные нелинейности. Плавные динамические нелинейности для устойчивых и стабильно обратимых моделей. Проблемы с помехами в нелинейном управлении. Негладкие нелинейности. Устойчивость нелинейных систем.	6	6		18
Раздел 12. Проекты управления ММО. Обратная связь по оценке состояния.					
	Динамическое программирование и оптимальное управление. Линейный квадратичный регулятор (LQR). Свойства линейного квадратичного оптимального регулятора. Согласование моделей на основе линейных квадратичных оптимальных регуляторов. Оптимальные регуляторы с дискретным временем. Соединения с назначением полюсов. Конструкция наблюдателя. Линейные оптимальные фильтры. Обратная связь по оценке состояния. Интерпретация передаточной функции. Достижение интегрального действия при синтезе LQR.	6	6		18
Раздел 13. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.					
	Исторические периоды теории управления. Типы проектирования систем управления. Системная интеграция. Определение проблемы. Прототип решения проблемы управления с помощью инверсии. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.	6	6		19
	Всего	68	68		179

4.2. Содержание практических занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Тема занятия	К-во часов	К-во часов СРС
семестр №1				
1	Раздел 1. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.	Исторические периоды теории управления. Типы проектирования систем управления. Системная интеграция. Определение проблемы. Прототип решения проблемы управления	5	5

		с помощью инверсии. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.		
2	Раздел 2. Моделирование сигналов и систем непрерывного действия.	2. Сложность модели. Построение моделей. Структуры модели. Модели пространства состояний. Дифференциальные модели высокого порядка и модели с разностными уравнениями. Ошибки моделирования. Линеаризация. Линейные модели непрерывного времени. Преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа. Свойства и примеры. Передаточные функции. Стабильность передаточных функций. Импульсные и ступенчатые характеристики линейных систем с непрерывным временем. Полюса, нули и временные характеристики. Частотная характеристика. Преобразование Фурье. Часто встречающиеся модели. Ошибки моделирования для линейных систем. Границы ошибок моделирования.	5	5
3	Раздел 3. Анализ контуров управления SISO.	Структуры обратной связи. Функции номинальной чувствительности. Стабильность в замкнутом контуре на основе характеристического полинома. Частотная характеристика. Относительная стабильность: Пределы стабильности и пики чувствительности. Прочность.	5	5
4	Раздел 4. Классическое ПИД-регулирование и синтез SISO-контроллеров.	4. Эмпирическая настройка PID: Метод колебаний Циглера-Николса (Z-N). Методы, основанные на кривой реакции. Компенсаторы опережения и запаздывания. Полиномиальный подход. Синтез PI и PID с использованием назначения полюсов. Предсказатель Смита.	5	5
5	Раздел 5. Фундаментальные ограничения в управлении SISO.	Ограничения погрешности модели. Структурные ограничения. Интегральные ограничения Боде на чувствительность. Интегральные ограничения на дополнительную чувствительность. Интегральное ограничение Пуассона на чувствительность. Интегральное ограничение Пуассона на дополнительную чувствительность.	5	5

6	Раздел 6. Архитектурные проблемы в системе управления SISO и ограничения.	Модели для детерминированных возмущений и ссылок. Принцип внутренней модели для возмущений. Принцип внутренней модели для отслеживания ссылок. Прямое управление. Каскадное управление. Завершение. Схема защиты от завершения. Насыщение состояния. Введение в модель прогнозирующего управления.	5	5
7	Раздел 7. Модели для систем дискретизации данных и цифрового управления.	Отбор проб. Реконструкция сигнала. Линейные модели с дискретным временем. Оператор сдвига и Z-преобразование. Дискретные передаточные функции. Дискретные модели дельта-области. Дискретное Дельта-преобразование. Дискретные передаточные функции. Передаточные функции и импульсные характеристики. Стабильность дискретной системы. Дискретные модели для дискретизированных непрерывных систем. Использование моделей непрерывного пространства состояний. Частотная характеристика систем с дискретизированными данными. Функции чувствительности к дискретному времени. Нули систем с дискретизированными данными	5	5
8	Раздел 8. Параметризация и управление контроллером SISO	Проектирование, основанное на оптимизации. Аффинная параметризация: Стабильный случай. Синтез ПИД с использованием аффинной параметризации. Аффинная параметризация для систем, имеющих временные задержки. Нежелательные полюса замкнутого контура. Аффинная параметризация: Нестабильный случай разомкнутого контура. Оптимальный Q (аффинный) синтез. Надежная схема управления с доверительными границами. Фундаментальные ограничения дешевого управления. Ограничения в частотной области	5	5

9	Раздел 9. Линейные модели пространства состояний.	Линейные модели пространства состояний с непрерывным временем. Преобразования подобия и передаточные функции. От передаточной функции к представлению пространства состояний. Управляемость и стабилизируемость. Наблюдаемость и обнаруживаемость. Каноническая декомпозиция. Отмена нулевого полюса и свойства системы.	5	5
10	Раздел 10. Синтез с помощью методов пространства состояний.	Назначение полюсов с помощью обратной связи по состоянию. Наблюдатели. Объединение обратной связи по состоянию с наблюдателем. Интерпретации передаточных функций. Переосмысление аффинной параметризации всех стабилизирующих контроллеров. Интерпретация принципа внутренней модели в пространстве состояний. Компромиссы в обратной связи по состоянию и наблюдателях. Работа с входными ограничениями в контексте обратной связи по оценке состояния	5	5
11	Раздел 11. Введение в нелинейный	Контроль. Линейное управление нелинейной установкой. Переключаемые линейные контроллеры. Управление системами с плавными нелинейностями. Статические входные нелинейности. Плавные динамические нелинейности для устойчивых и стабильно обратимых моделей. Проблемы с помехами в нелинейном управлении. Негладкие нелинейности. Устойчивость нелинейных систем.	6	6
12	Раздел 12. Проекты управления ММО. Обратная связь по оценке состояния.	Динамическое программирование и оптимальное управление. Линейный квадратичный регулятор (LQR). Свойства линейного квадратичного оптимального регулятора. Согласование моделей на основе линейных квадратичных оптимальных регуляторов. Оптимальные регуляторы с дискретным временем. Соединения с назначением полюсов. Конструкция наблюдателя. Линейные оптимальные фильтры. Обратная связь по оценке состояния. Интерпретация передаточной функции. Достижение интегрального	6	6

		действия при синтезе LQR.		
13	Раздел 13. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.	Исторические периоды теории управления. Типы проектирования систем управления. Системная интеграция. Определение проблемы. Прототип решения проблемы управления с помощью инверсии. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.	6	6
ИТОГО:			68	68
			ВСЕГО:	68

4.3. Содержание лабораторных занятий

Учебным планом не предусмотрено.

4.4. Содержание курсового проекта/работы⁴

Учебным планом курсовой проект/работа не предусмотрена.

4.5. Содержание расчетно-графического задания, индивидуальных домашних заданий⁵

Учебным планом не предусмотрено.

5. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

5.1. Реализация компетенций

1. Компетенция ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.

2. Компетенция ОПК-13. Способен использовать основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.

Наименование индикатора достижения компетенции	Используемые средства оценивания
ОПК- 1.1 Применяет естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	Экзамен, защита практической работы, защита, тестовый контроль, собеседование.
ОПК-13.1 Составляет математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.	Экзамен, защита практической работы, защита, тестовый контроль, собеседование.
ОПК-13.3 Применяет основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.	Экзамен, защита практической работы, защита, тестовый контроль, собеседование.

5.2. Типовые контрольные задания для промежуточной аттестации

5.2.1. Перечень контрольных вопросов (типовых заданий) для экзамена

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание вопросов (типовых заданий)
1	Раздел 1. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исторические периоды теории управления. 2. Типы проектирования систем управления. 3. Системная интеграция. Определение проблемы. 4. Прототип решения проблемы управления с помощью инверсии. 5. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром. 6. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.
2	Раздел 2. Моделирование сигналов и систем	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сложность модели. Построение моделей. Структуры модели. 2. Модели пространства состояний.

	непрерывного действия.	<ol style="list-style-type: none"> 3. Дифференциальные модели высокого порядка и модели с разностными уравнениями. 4. Ошибки моделирования. Линеаризация. Линейные модели непрерывного времени. 5. Преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа. Свойства и примеры. 6. Передаточные функции. 7. Стабильность передаточных функций. 8. Импульсные и ступенчатые характеристики линейных систем с непрерывным временем. 9. Полюса, нули и временные характеристики. 10. Частотная характеристика. Преобразование Фурье. Часто встречающиеся модели. 11. Ошибки моделирования для линейных систем. Границы ошибок моделирования.
3	Раздел 3. Анализ контуров управления SISO.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Структуры обратной связи. 2. Функции номинальной чувствительности. 3. Стабильность в замкнутом контуре на основе характеристического полинома. 4. Частотная характеристика. 5. Относительная стабильность: 6. Пределы стабильности и пики чувствительности. Прочность.
4	Раздел 4. Классическое ПИД-регулирование и синтез SISO-контроллеров.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Эмпирическая настройка PID: Метод колебаний Циглера-Николса (Z-N). 2. Методы, основанные на кривой реакции. 3. Компенсаторы опережения и запаздывания. Полиномиальный подход. 4. Синтез PI и PID с использованием назначения полюсов. Предсказатель Смита.
5	Раздел 5. Фундаментальные ограничения в управлении SISO.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничения погрешности модели. 2. Структурные ограничения. 3. Интегральные ограничения Боде на чувствительность. 4. Интегральные ограничения на дополнительную чувствительность. 5. Интегральное ограничение Пуассона на чувствительность. 6. Интегральное ограничение Пуассона на дополнительную чувствительность.

6	<p>Раздел 6. Архитектурные проблемы в системе управления SISO и ограничения.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Модели для детерминированных возмущений и ссылок. 2. Принцип внутренней модели для возмущений. Принцип внутренней модели для отслеживания ссылок. 3. Прямое управление. 4. Каскадное управление. 5. Завершение. 6. Схема защиты от завершения. 7. Насыщение состояния. 8. Введение в модель прогнозирующего управления.
7	<p>Раздел 7. Модели для систем дискретизации данных и цифрового управления.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отбор проб. Реконструкция сигнала. Линейные модели с дискретным временем. 2. Оператор сдвига и Z-преобразование. 3. Дискретные передаточные функции. Дискретные модели дельта-области. 4. Дискретное Дельта-преобразование. Дискретные передаточные функции. 5. Передаточные функции и импульсные характеристики. 6. Стабильность дискретной системы. Дискретные модели для дискретизированных непрерывных систем. 7. Использование моделей непрерывного пространства состояний. 8. Частотная характеристика систем с дискретизированными данными. 9. Функции чувствительности к дискретному времени. 10. Нули систем с дискретизированными данными
8	<p>Раздел 8. Параметризация и управление контроллером SISO</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проектирование, основанное на оптимизации. 2. Аффинная параметризация: Стабильный случай. 3. Синтез ПИД с использованием аффинной параметризации. 4. Аффинная параметризация для систем, имеющих временные задержки. 5. Нежелательные полюса замкнутого контура. 6. Аффинная параметризация: Нестабильный случай разомкнутого контура. 7. Оптимальный Q (аффинный) синтез. 8. Надежная схема управления с доверительными границами. 9. Фундаментальные ограничения дешевого управления. 10. Ограничения в частотной области

9	Раздел 9. Линейные модели пространства состояний.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Линейные модели пространства состояний с непрерывным временем. 2. Преобразования подобия и передаточные функции. От передаточной функции к представлению пространства состояний. 3. Управляемость и стабилизируемость. Наблюдаемость и обнаруживаемость. 4. Каноническая декомпозиция. 5. Отмена нулевого полюса и свойства системы.
10	Раздел 10. Синтез с помощью методов пространства состояний.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Назначение полюсов с помощью обратной связи по состоянию. Наблюдатели. 2. Объединение обратной связи по состоянию с наблюдателем. 3. Интерпретации передаточных функций. 4. Переосмысление аффинной параметризации всех стабилизирующих контроллеров. 5. Интерпретация принципа внутренней модели в пространстве состояний. 6. Компромиссы в обратной связи по состоянию и наблюдателях. 7. Работа с входными ограничениями в контексте обратной связи по оценке состояния
11	Раздел 11. Введение в нелинейный	<ol style="list-style-type: none"> 1. Контроль. Линейное управление нелинейной установкой. Переключаемые линейные контроллеры. 2. Управление системами с плавными нелинейностями. 3. Статические входные нелинейности. 4. Плавные динамические нелинейности для устойчивых и стабильно обратимых моделей. 5. Проблемы с помехами в нелинейном управлении. Негладкие нелинейности. 6. Устойчивость нелинейных систем.
12	Раздел 12. Проекты управления ММО. Обратная связь по оценке состояния	<ol style="list-style-type: none"> 1. Динамическое программирование и оптимальное управление. 2. Линейный квадратичный регулятор (LQR). Свойства линейного квадратичного оптимального регулятора. 3. Согласование моделей на основе линейных квадратичных оптимальных регуляторов. 4. Оптимальные регуляторы с дискретным временем. 5. Соединения с назначением полюсов. 6. Конструкция наблюдателя. 7. Линейные оптимальные фильтры. 8. Обратная связь по оценке состояния. Интерпретация передаточной функции. 9. Достижение интегрального действия при синтезе LQR.

13	Раздел 13. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.	<ol style="list-style-type: none">1. Исторические периоды теории управления. Типы проектирования систем управления.2. Системная интеграция.3. Определение проблемы.4. Прототип решения проблемы управления с помощью инверсии.5. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия.6. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром.7. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.
----	--	---

Типовой вариант экзаменационного билета

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Кафедра Технологии машиностроения

Дисциплина Математические основы робототехники

Направление 15.04.06 Мехатроника и робототехника

Профиль Робототехника и искусственный интеллект

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. Эмпирические методы настройки ПИД-регулятора для линейной системы SISO?
2. Критерии полной наблюдаемости линейной системы?
3. Решить задачу.

Consider a dynamical system

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \quad y = x_2$$

Questions:

- Is this system controllable?
- Is this system observable?
- Could you suggest a state feedback controller gains

$$u = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3$$

so that the closed loop system has its poles all at (-1)?

Утверждено на заседании кафедры ТМ

протокол № ___ от _____ г.

Зав.кафедрой ТМ

д.т.н., доц. Т.А.Дуюн

5.3. Типовые контрольные задания (материалы) для текущего контроля в семестре

Текущий контроль осуществляется в течение семестра в форме выполнения и защиты практических работ.

Практические работы. В учебном пособии по дисциплине представлен перечень практических работ, приведены необходимые теоретические и методические указания.

Защита практических работ возможна после проверки правильности выполнения задания и сохранения файла документа. Защита проводится в форме опроса преподавателем и демонстрации отдельных навыков по теме практической работы. Примерный перечень контрольных вопросов для защиты практических работ представлен в таблице.

№	Тема практической работы	Контрольные вопросы
семестр № 1		
1	Раздел 1. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исторические периоды теории управления. 2. Типы проектирования систем управления. 3. Системная интеграция. Определение проблемы. 4. Прототип решения проблемы управления с помощью инверсии. 5. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром. 6. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.
2	Раздел 2. Моделирование сигналов и систем непрерывного действия.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сложность модели. Построение моделей. Структуры модели. 2. Модели пространства состояний. 3. Дифференциальные модели высокого порядка и модели с разностными уравнениями. 4. Ошибки моделирования. Линеаризация. Линейные модели непрерывного времени. 5. Преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа. Свойства и примеры. 6. Передаточные функции. 7. Стабильность передаточных функций. 8. Импульсные и ступенчатые характеристики линейных систем с непрерывным временем. 9. Полюса, нули и временные характеристики. 10. Частотная характеристика. Преобразование Фурье. 11. Часто встречающиеся модели. 12. Ошибки моделирования для линейных систем. 13. Границы ошибок моделирования.
3	Раздел 3. Анализ контуров управления SISO.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Структуры обратной связи. 2. Функции номинальной чувствительности. 3. Стабильность в замкнутом контуре на основе характеристического полинома. 4. Частотная характеристика.

		5. Относительная стабильность: Пределы стабильности и пики чувствительности. Прочность.
4	Раздел 4. Классическое ПИД-регулирование и синтез SISO-контроллеров.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Эмпирическая настройка PID: Метод колебаний Циглера-Николса (Z-N). 2. Методы, основанные на кривой реакции. 3. Компенсаторы опережения и запаздывания. 4. Полиномиальный подход. 5. Синтез PI и PID с использованием назначения полюсов. Предсказатель Смита.
5	Раздел 5. Фундаментальные ограничения в управлении SISO.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничения погрешности модели. 2. Структурные ограничения. 3. Интегральные ограничения Боде на чувствительность. 4. Интегральные ограничения на дополнительную чувствительность. 5. Интегральное ограничение Пуассона на чувствительность. 6. Интегральное ограничение Пуассона на дополнительную чувствительность.
6	Раздел 6. Архитектурные проблемы в системе управления SISO и ограничения.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Модели для детерминированных возмущений и ссылок. 2. Принцип внутренней модели для возмущений. Принцип внутренней модели для отслеживания ссылок. 3. Прямое управление. 4. Каскадное управление. 5. Завершение. 6. Схема защиты от завершения. 7. Насыщение состояния. 8. Введение в модель прогнозирующего управления.
7	Раздел 7. Модели для систем дискретизации данных и цифрового управления.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отбор проб. Реконструкция сигнала. Линейные модели с дискретным временем. 2. Оператор сдвига и Z-преобразование. 3. Дискретные передаточные функции. Дискретные модели дельта-области. 4. Дискретное Дельта-преобразование. Дискретные передаточные функции. 5. Передаточные функции и импульсные характеристики. 6. Стабильность дискретной системы. Дискретные модели для дискретизированных непрерывных систем. 7. Использование моделей непрерывного пространства состояний. 8. Частотная характеристика систем с дискретизированными данными.

		<p>9. Функции чувствительности к дискретному времени.</p> <p>10. Нули систем с дискретизированными данными</p>
8	Раздел 8. Параметризация и управление контроллером SISO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проектирование, основанное на оптимизации. 2. Аффинная параметризация: Стабильный случай. 3. Синтез ПИД с использованием аффинной параметризации. 4. Аффинная параметризация для систем, имеющих временные задержки. 5. Нежелательные полюса замкнутого контура. 6. Аффинная параметризация: Нестабильный случай разомкнутого контура. 7. Оптимальный Q (аффинный) синтез. 8. Надежная схема управления с доверительными границами. 9. Фундаментальные ограничения дешевого управления. 10. Ограничения в частотной области
9	Раздел 9. Линейные модели пространства состояний.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Линейные модели пространства состояний с непрерывным временем. 2. Преобразования подобия и передаточные функции. От передаточной функции к представлению пространства состояний. 3. Управляемость и стабилизируемость. Наблюдаемость и обнаруживаемость. 4. Каноническая декомпозиция. 5. Отмена нулевого полюса и свойства системы.
10	Раздел 10. Синтез с помощью методов пространства состояний	<ol style="list-style-type: none"> 1. Назначение полюсов с помощью обратной связи по состоянию. Наблюдатели. 2. Объединение обратной связи по состоянию с наблюдателем. 3. Интерпретации передаточных функций. 4. Переосмысление аффинной параметризации всех стабилизирующих контроллеров. 5. Интерпретация принципа внутренней модели в пространстве состояний. 6. Компромиссы в обратной связи по состоянию и наблюдателях. 7. Работа с входными ограничениями в контексте обратной связи по оценке состояния
11	Раздел 11. Введение в нелинейный	<ol style="list-style-type: none"> 1. Контроль. Линейное управление нелинейной установкой. Переключаемые линейные контроллеры. 2. Управление системами с плавными нелинейностями. 3. Статические входные нелинейности.

		<ol style="list-style-type: none"> 4. Плавные динамические нелинейности для устойчивых и стабильно обратимых моделей. 5. Проблемы с помехами в нелинейном управлении. Негладкие нелинейности. 6. Устойчивость нелинейных систем.
12	<p>Раздел 12. Проекты управления ММО. Обратная связь по оценке состояния</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Динамическое программирование и оптимальное управление. 2. Линейный квадратичный регулятор (LQR). Свойства линейного квадратичного оптимального регулятора. 3. Согласование моделей на основе линейных квадратичных оптимальных регуляторов. 4. Оптимальные регуляторы с дискретным временем. 5. Соединения с назначением полюсов. 6. Конструкция наблюдателя. 7. Линейные оптимальные фильтры. 8. Обратная связь по оценке состояния. Интерпретация передаточной функции. 9. Достижение интегрального действия при синтезе LQR.
13	<p>Раздел 13. Введение в технологию управления и принципы обратной связи.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исторические периоды теории управления. Типы проектирования систем управления. 2. Системная интеграция. 3. Определение проблемы. 4. Прототип решения проблемы управления с помощью инверсии. 5. Обратная связь с высоким коэффициентом усиления и инверсия. 6. От архитектуры с открытым контуром к архитектуре с замкнутым контуром. 7. Компромиссы, связанные с выбором усиления обратной связи.

5.4. Описание критериев оценивания компетенций и шкалы оценивания

При промежуточной аттестации в форме экзамена используется следующая шкала оценивания: 2 – неудовлетворительно, 3 – удовлетворительно, 4 – хорошо, 5 – отлично⁶.

Критериями оценивания достижений показателей являются:

Наименование показателя оценивания результата обучения по дисциплине	Критерий оценивания
Знания	Знание терминов, определений, понятий
	Знание основных закономерностей, соотношений, принципов
	Объем освоенного материала
	Полнота ответов на вопросы
	Четкость изложения и интерпретации знаний
Умения	Уметь применять естественнонаучные и общинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.
	Уметь применять на практике математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.
	Уметь применять основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.
Навыки	Владеть навыками методов математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.
	Владеть навыками составления математических моделей импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.
	Владеть навыками применения основных положений, законов и методов естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.

Оценка преподавателем выставляется интегрально с учётом всех показателей и критериев оценивания.

⁶ В ходе текущей аттестации могут быть использованы балльно-рейтинговые шкалы.

Оценка сформированности компетенций по показателю Знания.

Критерий	Уровень освоения и оценка			
	2	3	4	5
Знание терминов, определений, понятий	Не знает терминов и определений	Знает термины и определения, но допускает неточности формулировок	Знает термины и определения	Знает термины и определения, может корректно сформулировать их самостоятельно
Знание основных закономерностей, соотношений, принципов	Не знает основные закономерности и соотношения, принципы построения знаний	Знает основные закономерности, соотношения, принципы построения знаний	Знает основные закономерности, соотношения, принципы построения знаний, их интерпретирует и использует	Знает основные закономерности, соотношения, принципы построения знаний, может самостоятельно их получить и использовать
Объем освоенного материала	Не знает значительной части материала дисциплины	Знает только основной материал дисциплины, не усвоил его деталей	Знает материал дисциплины в достаточном объеме	Обладает твердыми полным знанием материала дисциплины, владеет дополнительными знаниями
Полнота ответов на вопросы	Не дает ответы на большинство вопросов	Дает неполные ответы на все вопросы	Дает ответы на вопросы, но не все - полные	Дает полные, развернутые ответы на поставленные вопросы
Четкость изложения и интерпретации знаний	Излагает знания без логической последовательности	Излагает знания с нарушениями в логической последовательности	Излагает знания без нарушений в логической последовательности	Излагает знания в логической последовательности, самостоятельно их интерпретируя и анализируя
	Не иллюстрирует изложение поясняющими схемами, рисунками и примерами	Выполняет поясняющие схемы и рисунки небрежно и с ошибками	Выполняет поясняющие рисунки и схемы корректно и понятно	Выполняет поясняющие рисунки и схемы точно и аккуратно, раскрывая полноту усвоенных знаний
	Неверно излагает и интерпретирует знания	Допускает неточности в изложении и интерпретации знаний	Грамотно и по существу излагает знания	Грамотно и точно излагает знания, делает самостоятельные выводы

Оценка сформированности компетенций по показателю Умения

Критерий	Уровень освоения и оценка			
	2	3	4	5
Уметь применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	Не умеет применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности, постоянно допускает ошибки.	Умеет применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности, но допускает ошибки.	В целом успешно, умеет применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности, но иногда допускает ошибки.	Успешно умеет применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.
Уметь применять на практике математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.	Не умеет применять на практике математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, постоянно допускает ошибки.	Умеет применять на практике математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, но допускает ошибки.	В целом успешно, умеет применять на практике математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, но иногда допускает ошибки.	Успешно умеет применять на практике математические модели импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.
Уметь применять основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.	Не умеет применять основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем, постоянно допускает ошибки.	Умеет применять основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем, но допускает ошибки.	В целом успешно, умеет применять основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем, но иногда допускает ошибки.	Успешно умеет применять основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.

Оценка сформированности компетенций по показателю Навыки

Критерий	Уровень освоения и оценка			
	2	3	4	5
Владеть навыками методов математического анализа и моделирования в профессиональной	Не владеет навыками методов математического анализа и моделирования в профессиональной	Владеет навыками методов математического анализа и моделирования в профессиональной	В целом успешно, владеет навыками методов математического анализа и моделирования в	Успешно владеет навыками методов математического анализа и моделирования в

деятельности.	деятельности, постоянно допускает ошибки.	деятельности, но допускает ошибки.	профессиональной деятельности, но иногда допускает ошибки.	профессиональной деятельности.
Владеть навыками составления математических моделей импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.	Не владеет навыками составления математических моделей импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, постоянно допускает ошибки.	Владеет навыками составления математических моделей импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, но допускает ошибки.	В целом успешно владеет навыками составления математических моделей импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, но иногда допускает ошибки.	Успешно владеет навыками составления математических моделей импульсных систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули.
Владеть навыками применения основных положений, законов и методов естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.	Не владеет навыками применения основных положений, законов и методов естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем, постоянно допускает ошибки.	Владеет навыками применения основных положений, законов и методов естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем, но допускает ошибки.	В целом успешно владеет навыками применения основных положений, законов и методов естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем, но иногда допускает ошибки.	Успешно владеет навыками применения основных положений, законов и методов естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

6.1. Материально-техническое обеспечение

№	Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы
1	Учебная аудитория для проведения лекционных занятий	Компьютер с проектором. Маркерная доска, маркер. Учебная мебель. Рабочее место преподавателя.
2	Учебная аудитория для проведения практических занятий – Компьютерный класс	Компьютер с проектором. Компьютеры для студентов. Маркерная доска, маркер. Учебная мебель. Рабочее место преподавателя.
3	Лаборатория для проведения практикума	Компьютер с проектором. Маркерная доска, маркер. Учебная мебель. Рабочее место преподавателя. Оборудование: образовательный робототехнический комплекс "Робот-бабочка"

6.2. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение

1. Лицензионный пакет программ MATLAB/Simulink с пакетами Control System Toolbox, Robotics System Toolbox

6.3. Перечень учебных изданий и учебно-методических материалов

Перечень основной литературы:

1. G. Goodwin, S. Graebe, M. Salgado. "Control System Design." 2001

Перечень дополнительной литературы:

1. K. Astrom, R. Murray. "Feedback Systems. An Introduction for Scientists and Engineers." Princeton University Press. 2nd Edition. 2020
2. Leonov G.A., Yakubovich V.A., Gelig A. Kh. "Stability Of Stationary Sets In Control Systems With Discontinuous Nonlinearities," World Scientific Publishing, 2004
3. А.А. Первозванский. "Курс теории автоматического управления." Наука, 1986.

Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине:

В рамках самостоятельной работы обучающиеся используют Интернет-ресурсы MATLAB, где имеется большое количество примеров решения задач комбинации измерений, автономной робототехники и сенсорных сетей.

6.4. Перечень интернет ресурсов, профессиональных баз данных, информационно-справочных систем

1. Документация к MATLAB;
2. Control System Toolbox <https://www.mathworks.com/help/control/index.html>
3. Robotics System Toolbox
<https://www.mathworks.com/help/robotics/index.html>

7. УТВЕРЖДЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ

Рабочая программа утверждена на 20___/20___ учебный год
без изменений / с изменениями, дополнениями⁷

Протокол № _____ заседания кафедры от « ____ » _____ 20 ____ г.

Заведующий кафедрой _____
подпись, ФИО

Директор института _____
подпись, ФИО

⁷ Нужно подчеркнуть

Утверждение рабочей программы без изменений
Рабочая программа без изменений утверждена на 20 /20 учебный год.
Протокол № _____ заседания кафедры от «___» _____ 20 г.

Заведующий кафедрой _____
подпись, ФИО

Директор института _____
подпись, ФИО