

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
ИНСТИТУТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КАФЕДРА КИБЕРНЕТИКИ

ОДОБРЕНО УМС ИИКС

Протокол № 8/1/2024

от 28.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ТЕОРИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Направление подготовки
(специальность)

[1] 01.03.02 Прикладная математика и информатика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
6	2	72	15	15	30		12	0	30
Итого	2	72	15	15	30	0	12	0	

АННОТАЦИЯ

В курсе изучаются методы расчета нелинейных систем автоматического регулирования. Особое внимание уделяется кусочно-линейным системам. Изучаются аналитическое описание кусочно-линейных функций, методы построения фазовых портретов нелинейных систем, в том числе кусочно-линейных, метод припасовывания и точечного преобразования. Значительное место уделяется проблеме автоколебаний и методу гармонической линеаризации. Наряду с классическим МГЛ для расчета параметров симметричных и несимметричных автоколебаний рассматриваются способы учета старших гармоник, расчет систем с несколькими нелинейностями, разделенными нефилтующей линейной частью, методика оценки качества процессов при установлении автоколебаний. Случайные процессы и их воздействие на автоколебательные режимы рассматриваются с использованием метода статистической линеаризации. Изучается подавление автоколебаний на основе линейных и псевдолинейных корректирующих устройств. Рассматриваются критерии устойчивости Ляпунова, абсолютной устойчивости, круговой критерий. Теоретические знания закрепляются в рамках лабораторных работ на компьютере.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины являются теоретическое освоение методов анализа и синтеза нелинейных систем автоматического управления и формирование практических навыков расчета нелинейных систем как аналитическими, так и численными методами. Изучаются методы анализа устойчивости и качества нелинейных систем, особое внимание уделяется изучению методов анализа автоколебаний в системах.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания основ теории линейных автоматических систем, обыкновенных дифференциальных уравнений, операционного исчисления.

Курс является необходимым для освоения дисциплины «Цифровые динамические системы».

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции;	Код и наименование индикатора достижения
--	---------------------------	--	--

		Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	профессиональной компетенции
производственно-технологический			
разработка и сопровождение программного обеспечения	информационные и программные системы	<p>ПК-1.2 [1] - способен разрабатывать и применять прикладные программы при решении задач в области киберфизических и информационных систем</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.057, Анализ опыта: разработка математического и программного обеспечения киберфизических систем</p>	<p>З-ПК-1.2[1] - знать принципы построения и условия применения программ, используемых в задачах разработки и сопровождения киберфизических и информационных систем;</p> <p>У-ПК-1.2[1] - уметь обоснованно выбирать алгоритмы и программные средства для решения задач проектирования и сопровождения киберфизических и информационных систем;</p> <p>В-ПК-1.2[1] - владеть навыками использования прикладных программ при разработке и моделировании киберфизических и информационных систем</p>
разработка математического, программного и алгоритмического обеспечения для анализа и моделирования физических процессов	математические модели процессов в сложных технических системах	<p>ПК-4 [1] - Способен использовать современные языки и методы программирования, комплексы прикладных компьютерных программ, современную вычислительную технику, многопроцессорные вычислительные системы при решении производственных и научно-исследовательских задач в области</p>	<p>З-ПК-4[1] - знать современные языки и технологии программирования, комплексы прикладных компьютерных программ; ;</p> <p>У-ПК-4[1] - уметь разрабатывать наукоемкое программное обеспечение с использованием современных языков программирования ;</p> <p>В-ПК-4[1] - владеть навыками проведения</p>

		<p>прикладной математики и информатики</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 06.001</p>	<p>математического моделирования физических процессов с использованием существующих и разработанных программных комплексов</p>
научно-исследовательский			
<p>анализ, математическое моделирование динамики систем, разработка законов управления</p>	<p>летательные аппараты</p>	<p>ПК-1.3 [1] - способен анализировать и синтезировать системы автоматического управления</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 32.001</p>	<p>З-ПК-1.3[1] - знать методы анализа и синтеза систем автоматического управления; У-ПК-1.3[1] - уметь применять методы теории автоматического управления при разработке киберфизических систем; В-ПК-1.3[1] - владеть навыками использования программного обеспечения для математического моделирования систем автоматического управления</p>
<p>анализ и математическое моделирование физических процессов</p>	<p>системы ядерно-энергетического комплекса</p>	<p>ПК-1 [1] - Способен собирать, обрабатывать и интерпретировать результаты научных исследований в области прикладной математики и информационных технологий</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078</p>	<p>З-ПК-1[1] - знать основные методы научного познания, методы сбора и анализа информации;; У-ПК-1[1] - уметь анализировать информацию, строить логические схемы, интерпретировать результаты научных исследований, критически мыслить, сравнивать результаты различных исследований, формировать собственную позицию в рамках рассматриваемой задачи;;</p>

			В-ПК-1[1] - владеть навыками работы с научной литературой и навыками интерпретации результатов научных исследований;
анализ и математическое моделирование физических процессов	системы ядерно-энергетического комплекса	ПК-2 [1] - Способен понимать, применять и совершенствовать современный математический аппарат <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078	З-ПК-2[1] - знать современный математический аппарат, используемый при описании, решении и анализе различных прикладных задач; У-ПК-2[1] - использовать современный математический аппарат для построения математических моделей и алгоритмов решения различных прикладных задач; В-ПК-2[1] - владеть навыками применения современного математического аппарата для построения математических моделей различных процессов, для обработки экспериментальных, статистических и теоретических данных, для разработки новых алгоритмов и методов исследования задач различных типов

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование навыков коммуникации, командной работы и лидерства (В20)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование способности и стремления следовать в профессии

	нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения (B21)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22)

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>6 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	8/8/15	КЛ-8 (15), ЛР-8 (10)	25	КИ-8	3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4
2	Часть 2	9-15	7/7/15	ЛР-12 (10), ЛР-15 (15)	25	КИ-15	3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-4,

							У-ПК-4, В-ПК-4
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		15/15/30		50		
	Контрольные мероприятия за 6 Семестр				50	30	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2

* – сокращенное наименование формы контроля

** – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
Кл	Коллоквиум
ЗО	Зачет с оценкой
ЛР	Лабораторная работа
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	15	15	30
1-8	Часть 1	8	8	15
1 - 4	Математические модели нелинейных систем автоматического управления. Линейные и нелинейные системы автоматического управления (НСАУ). Основные особенности НСАУ. Графический способ построения выходного сигнала нелинейности. Применение кусочно-линейных функций (КЛФ) для описания статических нелинейностей. Аналитическое описание кусочно-линейных функций. Однозначные и двузначные нелинейности. Аналитическое представление типовых однозначных и многозначных нелинейностей. Компенсация нелинейностей. Обратные кусочно-линейные функции.	Всего аудиторных часов		
		4	4	8
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 8	Фазовые портреты Применение метода фазовой плоскости для анализа НСАУ. Методы построения фазовых портретов: метод изоклин, метод Льенара/Пелла. Фазовые портреты НСАУ	Всего аудиторных часов		
		4	4	7
		Онлайн		
		0	0	0

	с КЛФ. Многолистные фазовые поверхности. Метод припасовывания. Метод точечного преобразования.			
9-15	Часть 2	7	7	15
9 - 13	Автоколебательные процессы в системах управления. Исследование симметричных автоколебаний. Гармоническая линеаризация однозначных и двузначных нелинейностей. Эквивалентная передаточная функция. Метод гармонической линеаризации (МГЛ) при симметричных колебаниях и учете одной гармоники. Обоснование метода гармонической линеаризации. Анализ устойчивости автоколебаний. Метод шаблонов. Области устойчивости. Модификации метода гармонической линеаризации. Исследование и подавление автоколебаний. Метод гармонической линеаризации при несимметричных колебаниях и внешних воздействиях. Обобщение МГЛ для анализа автоколебаний в системах управления со слабо фильтрующей линейной частью и системах с несколькими нелинейностями. Учет высших гармоник для уточнения первой в МГЛ. Метод экспоненциальной гармонической линеаризации и его применение для исследования качества НСАУ. Диаграммы качества. Способы подавления автоколебаний. Линейные и псевдолинейные корректирующие устройства. Однородные корректирующие устройства.	Всего аудиторных часов		
		5	6	15
		Онлайн		
		0	0	0
14 - 15	Устойчивость нелинейных САУ Понятия устойчивости в нелинейных САУ. Устойчивость «в малом», «в большом», «в целом», абсолютная устойчивость. Исследование устойчивости методом Ляпунова. Функции Ляпунова, их свойства. Теоремы Ляпунова. Анализ устойчивости нелинейных САУ методом Ляпунова. Анализ устойчивости по первому приближению. Необходимое условие абсолютной устойчивости. Критерии абсолютной устойчивости НСАУ положения равновесия. Теорема В.-М. Попова. Круговой критерий.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 8	Лабораторная работа 1 Однозначные и двузначные нелинейности
9 - 12	Лабораторная работа 2 Фазовые портреты кусочно-линейных систем
13 - 16	Лабораторная работа 3 Расчет и подавление автоколебаний в нелинейной системе

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 2	Графоаналитический способ анализа нелинейности Графическое построение реакции нелинейного элемента на сигнал. Фазопережающие и фазопаздывающие нелинейности.
3 - 4	Аналитическое описание кусочно-линейных функций Аналитическое описание типовых однозначных и двузначных нелинейностей. Компенсация нелинейностей.
5 - 6	Фазовые портреты нелинейных систем Построение фазового портрета линеаризацией вблизи особых точек
7 - 8	Фазовые портреты кусочно-линейных систем Построение многолистного фазового портрета на примере реле с гистерезисом и зоной нечувствительности
9 - 10	Гармоническая линеаризация нелинейности Вычисление коэффициентов гармонической линеаризации
11 - 12	Метод гармонической линеаризации Расчет симметричных автоколебаний в системе третьего порядка с нелинейностью типа реле
13 - 14	Несимметричные автоколебания Вычисление параметров несимметричных автоколебаний в системе с ненулевым входным сигналом
15	Критерий абсолютной устойчивости Применение критерия абсолютной устойчивости для анализа кусочно-линейных систем

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс базируется на сочетании и совмещении теоретической и практической подготовки студентов в рамках единых занятий. В начале занятий в форме лекции даются теоретические основы и описываются методы решения задачи, а затем в форме семинара проводится закрепление пройденного материала посредством решения задач, оценки различных вариантов решений, а также совместного обсуждения изученных приемов.

В рамках данного курса проводится серия лабораторных работ, состоящая в выполнении ряда заданий по ходу изучения дисциплины в компьютерных классах кафедры, оборудованных новейшей вычислительной техникой с последующей защитой лабораторных работ.

Теоретический материал курса представлен в виде текста лекций.

Практические задания и темы лабораторных работ разработаны для выработки навыков практического применения методов анализа и синтеза нелинейных САУ.

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1	З-ПК-1	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-1	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-1	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
ПК-1.2	З-ПК-1.2	ЗО, КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-1.2	ЗО, КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-1.2	ЗО, КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
ПК-1.3	З-ПК-1.3	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-1.3	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-1.3	ЗО, КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
ПК-2	З-ПК-2	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-2	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-2	ЗО, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
ПК-4	З-ПК-4	КИ-8, КИ-15
	У-ПК-4	КИ-8, КИ-15
	В-ПК-4	КИ-8, КИ-15

Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-х балльной шкале	Отметка о зачете	Оценка ECTS
90-100	5 – «отлично»	«Зачтено»	А
85-89	4 – «хорошо»		В

75-84			C
70-74			D
65-69	3 – «удовлетворительно»		E
60-64			F
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	«Не зачтено»	

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 681.5 Ж92 Нелинейные системы автоматического управления. Метод гармонического баланса. Инженерно-физические основы : учебное пособие для вузов, Журомский В.М., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
2. ЭИ Ж92 Нелинейные системы автоматического управления. Метод гармонического баланса. Инженерно-физические основы : учебное пособие для вузов, Журомский В.М., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
3. ЭИ Н 65 Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем : , Никулин Е.А., Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2015
4. 681.5 К87 Расчет установившихся режимов и переходных процессов в нелинейных системах : учебное пособие для вузов, Шумилов Ю.Ю., Ктитров С.В., Москва: МИФИ, 2008

5. ЭИ К87 Расчет установившихся режимов и переходных процессов в нелинейных системах : учебное пособие для вузов, Шумилов Ю.Ю., Ктитров С.В., Москва: МИФИ, 2008
6. ЭИ К 88 Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) : учебное пособие, Кудинов Ю. И., Пащенко Ф. Ф., Санкт-Петербург: Лань, 2022
7. ЭИ П 23 Теория автоматического управления. Задачи и решения : , Певзнер Л. Д., Санкт-Петербург: Лань, 2022

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 681.5 И24 Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем : учебник для вузов, Иващенко Н.Н., М.: Машиностроение, 1978
2. 681.5 Т58 Атлас для проектирования систем автоматического регулирования : Учеб. пособие для вузов, Топчеев Ю.И., М.: Машиностроение, 1989
3. 681.5 Т58 Задачник по теории автоматического регулирования : Учеб. пособие для вузов, Цыпьяков А.П., Топчеев Ю.И., М.: Машиностроение, 1977
4. 681.5 П58 Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления : Учеб. пособие для вузов, Попов Е.П., М.: Наука, 1979

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. СИНУС

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. СИСТЕМА ВЕКТОР (vector.mephi.ru)

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Компьютерный класс ()
2. Проектор

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

Указания к выполнению лабораторного практикума

Лабораторный практикум включает 3 работы. Работы выполняются в программе СИНУС.

Для ввода данных в программу необходимо выполнить начальную обработку исходных данных. Для первой лабораторной работы по передаточной функции необходимо построить структурную схему и получить систему дифференциальных уравнений.

При выполнении второй лабораторной работы можно использовать возможность вычислений с использованием комплексных чисел. Для логарифмического критерия Найквиста следует использовать функции \arg/Arg , контролируя направление приращения фазовой характеристики.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Рекомендации к проведению лабораторного практикума

Лабораторный практикум включает 3 работы. Работы выполняются в программе СИЛУС.

Для ввода данных в программу необходимо выполнить начальную обработку исходных данных. Для первой лабораторной работы по передаточной функции необходимо построить структурную схему и получить систему дифференциальных уравнений.

Контролируется наличие структурной схемы и системы дифференциальных уравнений. Проверяется порядок системы.

При выполнении второй лабораторной работы можно использовать возможность вычислений с использованием комплексных чисел. Для логарифмического критерия Найквиста следует использовать функции \arg/Arg , контролируя направление приращения фазовой характеристики.

В работе №2 проверять направление движения по фазовым траекториям и особые точки.

В работе №3 обязательно проверять результат моделирования до и после подавления автоколебаний.

Автор(ы):

Ктитров Сергей Викторович, к.т.н., доцент