

ИНСТИТУТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КАФЕДРА КИБЕРНЕТИКИ

ОДОБРЕНО УМС ИИКС

Протокол № 4/1/2023

от 25.04.2023 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	3	108	15	15	30	12	0	Э
Итого	3	108	15	15	30	15	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; Основание	Код и наименование индикатора достижения профессиональной
--	---------------------------	---	---

		(профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	компетенции
научно-исследовательский			
анализ и математическое моделирование физических процессов	системы ядерно-энергетического комплекса	<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;;</p> <p>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> <p>В-ПК-1[1] - владеть навыками работы с научной литературой и навыками интерпретации результатов научных исследований;</p>
анализ, математическое моделирование динамики систем, разработка законов управления	летательные аппараты	<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;</p> <p>У-ПК-1.3[1] - уметь применять методы теории автоматического управления при разработке киберфизических систем;</p> <p>В-ПК-1.3[1] - владеть навыками использования программного обеспечения для математического моделирования систем</p>

<p>анализ и математическое моделирование физических процессов</p>	<p>системы ядерно-энергетического комплекса</p>	<p>ПК-2 [1] - Способен понимать, применять и совершенствовать современный математический аппарат</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078</p>	<p>автоматического управления</p> <p>3-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</p>
<p>производственно-технологический</p>			
<p>разработка и сопровождение программного обеспечения</p>	<p>информационные и программные системы</p>	<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,</p>	<p>3-ПК-1.2[1] - знать принципы построения и условия применения программ, используемых в задачах разработки и сопровождения киберфизических и информационных систем; У-ПК-1.2[1] - уметь обоснованно выбирать алгоритмы и</p>

		Анализ опыта: разработка математического и программного обеспечения киберфизических систем	программные средства для решения задач проектирования и сопровождения киберфизических и информационных систем; В-ПК-1.2[1] - владеть навыками использования прикладных программ при разработке и моделировании киберфизических и информационных систем
--	--	--	---

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
--------------------------------	-------------------------	------------------------------------

#### 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (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	З-ПК- 1, У- ПК-1, В- ПК-1, З-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
2	Часть 2	9-15	7/7/15	ЛР-12 (10), ЛР-15 (15)	25	КИ-15	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
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		15/15/30		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 6 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-1.3, У-

							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
ЛР	Лабораторная работа
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	15	15	30
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	8	8	15
1 - 4	<b>Математические модели нелинейных систем автоматического управления.</b> 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	<b>Фазовые портреты</b> Применение метода фазовой плоскости для анализа НСАУ. Методы построения фазовых портретов: метод изоклин, метод Лъенара/Пелла. Фазовые портреты НСАУ с КЛФ. Многолистные фазовые поверхности. Метод припасовывания. Метод точечного преобразования.	Всего аудиторных часов		
		4	4	7
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-15</b>	<b>Часть 2</b>	7	7	15
9 - 13	<b>Автоколебательные процессы в системах управления.</b> Исследование симметричных автоколебаний. Гармоническая линеаризация однозначных и двузначных нелинейностей. Эквивалентная передаточная функция.	Всего аудиторных часов		
		5	6	15
		Онлайн		
		0	0	0

	<p>Метод гармонической линеаризации (МГЛ) при симметричных колебаниях и учете одной гармоники. Обоснование метода гармонической линеаризации. Анализ устойчивости автоколебаний. Метод шаблонов. Области устойчивости.</p> <p>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.</p>			
14 - 15	<p><b>Устойчивость нелинейных САУ</b></p> <p>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.</p>	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	<b>Лабораторная работа 1</b> Однозначные и двузначные нелинейности
9 - 12	<b>Лабораторная работа 2</b> Фазовые портреты кусочно-линейных систем
13 - 16	<b>Лабораторная работа 3</b>



## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 2	<b>Графоаналитический способ анализа нелинейности</b> Графическое построение реакции нелинейного элемента на сигнал. Фазопережающие и фазоотстающие нелинейности.
3 - 4	<b>Аналитическое описание кусочно-линейных функций</b> Аналитическое описание типовых однозначных и двузначных нелинейностей. Компенсация нелинейностей.
5 - 6	<b>Фазовые портреты нелинейных систем</b> Построение фазового портрета линеаризацией вблизи особых точек
7 - 8	<b>Фазовые портреты кусочно-линейных систем</b> Построение многолистного фазового портрета на примере реле с гистерезисом и зоной нечувствительности
9 - 10	<b>Гармоническая линеаризация нелинейности</b> Вычисление коэффициентов гармонической линеаризации
11 - 12	<b>Метод гармонической линеаризации</b> Расчет симметричных автоколебаний в системе третьего порядка с нелинейностью типа реле
13 - 14	<b>Несимметричные автоколебания</b> Вычисление параметров несимметричных автоколебаний в системе с ненулевым входным сигналом
15	<b>Критерий абсолютной устойчивости</b> 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	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
ПК-1.2	З-ПК-1.2	КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-1.2	КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-1.2	КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
ПК-1.3	З-ПК-1.3	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-1.3	КИ-8, КИ-15, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-1.3	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
ПК-2	З-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	У-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-15
	В-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15, Кл-8, ЛР-8, ЛР-12, ЛР-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-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической

			литературы.
85-89	4 – «хорошо»	В	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		С	
70-74		Д	
65-69	3 – «удовлетворительно»	Е	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	Ф	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 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, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
2. ЭИ Ж92 Нелинейные системы автоматического управления. Метод гармонического баланса. Инженерно-физические основы : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
3. ЭИ Н 65 Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем : , Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2015
4. ЭИ К 88 Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
5. ЭИ П 23 Теория автоматического управления. Задачи и решения : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
6. 681.5 К87 Расчет установившихся режимов и переходных процессов в нелинейных системах : учебное пособие для вузов, С. В. Ктитров, Ю. Ю. Шумилов, Москва: МИФИ, 2008
7. ЭИ К87 Расчет установившихся режимов и переходных процессов в нелинейных системах : учебное пособие для вузов, С. В. Ктитров, Ю. Ю. Шумилов, Москва: МИФИ, 2008

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

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

#### 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 СИМУС.

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