

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
ЦИФРОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

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
7	2	72	16	0	32		24	0	3
Итого	2	72	16	0	32	16	24	0	

АННОТАЦИЯ

В курсе изучаются методы расчета дискретно-непрерывных систем автоматического управления. В качестве инструмента анализа импульсных систем используется z-преобразование, которое выводится из преобразования Лапласа. Рассматриваются методы расчета дискретно-непрерывных систем, включая расчет в межтактовые моменты времени. Изучаются критерии устойчивости, включая нелинейные системы, описание систем в пространстве состояний, управляемость, наблюдаемость систем, методика построения наблюдателей состояния. Значительное внимание уделяется синтезу корректирующих устройств. Рассматриваются особенности применения метода гармонической линеаризации для расчета параметров автоколебаний в нелинейных дискретно-непрерывных системах и критерия абсолютной устойчивости, включая 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 линейных и нелинейных дискретно-непрерывных систем автоматического управления и формирование практических навыков расчета таких систем как аналитическими, так и численными методами. Изучаются методы анализа устойчивости и качества систем, особое внимание уделяется частотным методам анализа и синтеза дискретно-непрерывных САУ.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания основ теории линейных и нелинейных систем автоматического управления, обыкновенных дифференциальных уравнений и операционного исчисления.

Полученные в курсе знания будут востребованы в рамках дисциплины «Цифровая обработка сигналов».

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 (профессиональный	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
--	---------------------------	---	---

		стандарт-ПС, анализ опыта)	
научно-исследовательский			
анализ и математическое моделирование физических процессов	системы ядерно-энергетического комплекса	ПК-1.1 [1] - способен применять цифровые методы обработки информации <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078	З-ПК-1.1[1] - знать методы и алгоритмы компьютерной обработки информации; У-ПК-1.1[1] - уметь обоснованно выбирать алгоритмы при обработке данных; В-ПК-1.1[1] - владеть навыками использования компьютера и/или реализации алгоритмов обработки информации в программном обеспечении
анализ, математическое моделирование динамики систем, разработка законов управления	летательные аппараты	ПК-1.3 [1] - способен анализировать и синтезировать системы автоматического управления <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 32.001	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
анализ и математическое моделирование физических процессов	системы ядерно-энергетического комплекса	ПК-1 [1] - Способен собирать, обрабатывать и интерпретировать результаты научных исследований в области прикладной математики и информационных технологий	З-ПК-1[1] - знать основные методы научного познания, методы сбора и анализа информации;; У-ПК-1[1] - уметь анализировать информацию, строить логические схемы,

		<p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078</p>	<p>интерпретировать результаты научных исследований, критически мыслить, сравнивать результаты различных исследований, формировать собственную позицию в рамках рассматриваемой задачи;; В-ПК-1[1] - владеть навыками работы с научной литературой и навыками интерпретации результатов научных исследований;</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>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</p>

			алгоритмов и методов исследования задач различных типов
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>

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (В18)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование профессионально значимых установок: не производить, не копировать и не использовать программные и технические средства, не приобретённые на законных

	основаниях; не нарушать признанные нормы авторского права; не нарушать тайны передачи сообщений, не практиковать вскрытие информационных систем и сетей передачи данных; соблюдать конфиденциальность доверенной информации (B40)
--	---

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>7 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	8/0/16	ЛР-6 (10), Кл-8 (15)	25	КИ-8	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 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-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
2	Часть 2	9-16	8/0/16	ЛР-12 (10), ЛР-16 (15), ДЗ-13 (5)	25	КИ-16	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 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-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2,

							В-ПК-2
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		16/0/32		50		
	Контрольные мероприятия за 7 Семестр				50	3	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 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-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 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
ДЗ	Домашнее задание
ЛР	Лабораторная работа
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>7 Семестр</i>	16	0	32
1-8	Часть 1	8	0	16
1 - 8	Математические модели систем с квантованием по времени и по уровню. Частотные характеристики. Типовые структуры цифровых систем управления. Особенности цифрового управления. Дискретно-непрерывные системы автоматического управления (ДНСАУ). Примеры ДНСАУ. Виды квантования в цифровых динамических системах. Математические модели аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. Импульсный элемент. Экстраполяторы различных порядков. Применение теоремы Котельникова. Решетчатые функции и импульсные функции. Импульсные передаточные функции. Передаточные функции экстраполяторов 0-го и 1-го порядков. Z-преобразование. Способы вычисления z-преобразования.	Всего аудиторных часов		
		8	0	16
		Онлайн		
		0	0	0

	<p>Связь преобразования Лапласа функции непрерывного времени и z-преобразования. Обратное z-преобразование, его свойства и способы вычисления. Структурные преобразования в цифровых системах. Преобразование последовательного соединения линейных динамических звеньев, разделенных и не разделенных квантователем по времени. Замыкание цифровых систем. Методы вычисления реакции системы в тактовые и межтакты времени. Метод дробного квантования. Модифицированное z-преобразование (z-m преобразование), его свойства, способы вычисления. Скрытые колебания в дискретно-непрерывных системах. Свойства z- и z-m- передаточных функций дискретных систем.</p> <p>Частотные характеристики. Преобразование полюсов цифровых систем. Частотные характеристики цифровых систем. Билинейное преобразование. Псевдочастота. Абсолютная псевдочастота. Области подобия. Преобразование комплексных плоскостей. Годографы и корневые годографы цифровых и дискретно-непрерывных систем и их свойства.</p>			
9-16	Часть 2	8	0	16
9 - 12	<p>Исследование устойчивости и точности систем линейных систем.</p> <p>Теоремы Ляпунова об устойчивости. Функции Ляпунова. Устойчивость в первом приближении. Алгебраические критерии устойчивости систем. Критерии Шур-Кона, Гурвица, Джури. Принцип аргумента. Критерии Михайлова и Михайлова-Найквиста. Лога-рифмический критерий Михайлова-Найквиста.</p> <p>Использование нормы матрицы для определения устойчивости автономной системы. Динамическая точность цифровых и дискретно-непрерывных систем управления. Коэффициенты ошибок.</p>	Всего аудиторных часов		
		4	0	8
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 16	<p>Системы в пространстве состояний. Синтез корректирующих устройств. Нелинейные системы.</p> <p>Системы в пространстве состояний. Дискретно-непрерывные и дискретные системы в пространстве состояний. Получение разностных уравнений по передаточным функциям. Методы последовательного, параллельного и непосредственного программирования. Переходная матрица и ее свойства. Особенности переходной матрицы дискретной системы. Уравнения в пространстве состояний дискретно-непрерывной системы с экстраполятором 0-го и 1-го порядков. Управляемость и наблюдаемость. Критерии управляемости и наблюдаемости. Теоремы о влиянии обратной связи на управляемость и наблюдаемость. Теорема о связи управляемости и наблюдаемости со свойствами передаточной функции.</p>	Всего аудиторных часов		
		4	0	8
		Онлайн		
		0	0	0

<p>Наблюдатели состояния полного и пониженного порядков Аппроксимация квантования по времени запаздыванием. Синтез цифровых корректирующих устройств. Применение билинейного преобразования для синтеза корректирующих устройств. Синтез аналоговых регуляторов в обратной связи. ПИД-регуляторы. Синтез систем с апериодическим переходным процессом. Нелинейные явления в ДНСАУ. Определение периодических режимов в нелинейных ДНСАУ. Гармоническая линеаризация нелинейных элементов в ДНСАУ. Применение метода гармонической линеаризации для нахождения автоколебаний в нелинейных ДНСАУ. Связь непрерывных и дискретных ко-эффективных гармонической линеаризации. Абсолютная устойчивость. Достаточное условие абсолютной устойчивости. Частотный критерий абсолютной устойчивости. Круговой критерий.</p>			
--	--	--	--

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>7 Семестр</i>
1 - 8	Лабораторная работа 1 Исследование влияния квантования по времени на устойчивость и качество дискретно-непрерывных систем
9 - 12	Лабораторная работа 2 Устойчивость дискретно-непрерывных систем
13 - 16	Лабораторная работа 3 Синтез цифрового корректирующего устройства в дискретно-непрерывной системе

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1 - 4	Основы z-преобразования Вычисление z-преобразования через ряд и преобразование Лапласа. Вычисление обратного z-преобразования.
5 - 8	Вычисление выхода в межтактовые моменты времени

	Использование метода дробного квантования и модифицированного z-преобразования для вычисления выхода дискретно-непрерывной системы в межтактын моменты времени.
9 - 12	Алгебраические критерии устойчивости Оценка устойчивости системы с использованием критериев Шура-Кона, Гурвица, Джюри.
13 - 16	Системы в пространстве состояний Синтез наблюдателей состояния полного и пониженного порядка

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 дискретно-непрерывных 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	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16, ДЗ-13
	У-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16, ДЗ-13
	В-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16, ДЗ-13
ПК-1.1	З-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, Кл-8, ЛР-12, ЛР-16, ДЗ-13
	У-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, Кл-8, ЛР-12, ЛР-16, ДЗ-13
	В-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, Кл-8, ЛР-12, ЛР-16, ДЗ-13
ПК-1.2	З-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16
	У-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16

	В-ПК-1.2	3, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16
ПК-1.3	З-ПК-1.3	3, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16
	У-ПК-1.3	3, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16
	В-ПК-1.3	3, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16
ПК-2	З-ПК-2	3, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16
	У-ПК-2	3, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16
	В-ПК-2	3, КИ-8, КИ-16, ЛР-6, ЛР-12, ЛР-16

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»	A
85-89	4 – «хорошо»		B
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. ЭИ Г 14 Анализ и аналитический синтез цифровых систем управления : учебное пособие, Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А., Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. 681.5 Ш23 Лабораторный практикум "Теория автоматического управления. Методы исследования нелинейных систем" : учебное пособие для вузов, Шапкарин А.В., Кулло И.Г., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
3. ЭИ М 20 Сборник тестовых задач по теории автоматического управления : , Малышенко А. М., Вадутов О. С., Санкт-Петербург: Лань, 2022
4. 681.5 Ж92 Цифровые автоматические системы. Основы анализа : учебное пособие, Журомский В.М., Москва: МИФИ, 2010

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 65 Д69 Современные системы управления : , Бишоп Р., Дорф Р., Москва: Лаборатория базовых знаний; Юнимедиастайл, 2004
2. 62 Ц97 Теория нелинейных импульсных систем : , Попков Ю.С., Цыпкин Я.З., М.: Наука, 1973
3. 681.5 В93 Устройства и системы автоматического управления высокой точности : , Шидловский В.С., Сырямкин В.И., Выскуб В.Г., Томск: Изд-во Томского университета, 2009

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. СИНУС

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. LMS Система Вектор

<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 лабораторным занятиям

Лабораторный практикум включает 3 работы, объединенные общим вариантом задания. По каждой работе оформляется отчет с титульным листом, описанием полученных результатов и заключением. Работы объединены одним вариантом системы, на примере которого изучаются численные и аналитические методы анализа и синтеза дискретно-непрерывных САУ. Практикум выполняется с использованием программы Sinus.exe.

При решении задач и выполнении лабораторного практикума используется таблица z-преобразования.

Примеры использования программы Sinus для исследования дискретно-непрерывных систем

Пример 1. Система с квантованием по времени с тактом 0,05 и экстраполятором 0-го порядка. Зададим функциональный элемент «Экстраполятор» с параметром 0.05 и обозначим его e . Запишем систему

$$\begin{aligned} \text{Omg} &= 16.2 \\ u &= 3 * \sin(\text{Omg} * t + 0.4) \\ x1' &= 5 * x2 \\ x2' &= x3 - x2 \\ x3' &= 10 * (F(u - e(x1)) - x3) \end{aligned}$$

Шаг интегрирования зададим равным 0.01.

Пример 2. Сравним переходные процессы в системе с экстраполятором в прямой цепи после нелинейности и в импульсной системе. Зададим импульсный элемент с тем же тактом дискретизации, назвав его ie .

Система с импульсным элементом

$$\begin{aligned} \text{Omg} &= 16.2 \\ u &= 3 * \sin(\text{Omg} * t + 0.4) \\ x1' &= 5 * x2 \\ x2' &= x3 - x2 \\ x3' &= 10 * (ie(F(u - x1)) - x3) \end{aligned}$$

Система с экстраполятором 0-го порядка

$$\begin{aligned} \text{Omg} &= 16.2 \\ u &= 3 * \sin(\text{Omg} * t + 0.4) \\ x1' &= 5 * x2 \\ x2' &= x3 - x2 \\ x3' &= 10 * (e(ie (F(u-x1))) - x3) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \text{Omg} &= 16.2 \\ u &= 3 * \sin(\text{Omg} * t + 0.4) \\ x1' &= 5 * x2 \\ x2' &= x3 - x2 \\ x3' &= 10 * (e(F(u-x1)) - x3) \end{aligned}$$

Пример 3. Зададим дискретно-непрерывную по времени систему. Добавим перед нелинейностью дискретную подсистему, реализованную разностным уравнением

.

Представим это уравнение с использованием алгебраического уравнения с начальными условиями. Зададим импульсный элемент, обозначив его ie .

Записать уравнение в виде

$$y := y * 0.9 + 0.2 * u$$

будет ошибкой, если шаг моделирования по времени будет меньше такта дискретизации (а именно это и требуется для анализа такой системы), т. к. переменная y будет меняться на каждом шаге. С другой стороны

$$y := ie(y * 0.9 + 0.2 * u)$$

в межтактовые моменты времени обнулит переменную y . Верное решение

$$y := y + ie(-0.1 * y + 0.2 * u)$$

или

$$y := e(0.9 * y + 0.2 * u),$$

где e – экстраполятор 0-го порядка. Окончательно запишем

$$\begin{aligned} \text{Omg} &= 16.2 \\ u &= 3 * \sin(\text{Omg} * t + 0.4) \\ y &:= e(0.9 * y + 0.2 * e(F(u-x1))) \\ x1' &= 5 * x2 \\ x2' &= x3 - x2 \\ x3' &= 10 * (y - x3) \end{aligned}$$

Следует выбирать шаг моделирования меньше самой малой постоянной времени системы, шаг дискретизации должен быть кратен шагу моделирования.

Инструкция по использованию программы СИМУС

НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ

Программа СИМУС-Д предназначена для численного решения систем линейных и нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, заданных в форме Коши, функционально-дифференциальных уравнений, разностных уравнений с последующим анализом результатов как в численной, так и в графической форме. Возможно построение графиков сложных функций.

Для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений используется явный метод Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом. Правая часть уравнений может содержать элементарные нелинейные функции, сложные функции, построенные на их основе, кусочно-нелинейные функции, объединенные на основе логических правил.

Система уравнений может быть образована из дифференциальных уравнений, алгебраических выражений, комплекснозначных алгебраических выражений, разностных уравнений, функциональных алгебраических выражений (функциональных соотношений), алгебраических уравнений, которые задают переменные как неявные функции.

Независимая переменная имеет предопределенное имя t и изменяется в процессе моделирования с постоянным положительным шагом.

Модель может быть задана уравнениями 3-х типов и алгебраическими выражениями 3-х типов. Чтобы добавить уравнение (выражение), следует выбрать его тип и задать имя определяемой им переменной. Имя не может содержать символы математических операций и совпадать с именами встроенных или заданных пользователем функций. Рекомендуется сначала добавить к модели уравнения требуемых типов, потом определить их правые части. Тип заданного уравнения в списке и редакторе правой части обозначен условным знаком равенства:

'= дифференциальное уравнение, которое должно быть задано в форме Коши. Интегрируется явным методом Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом.

== алгебраическое выражение. Вычисляется в порядке описания в окне 4 раза на каждом шаге, если в системе задано хотя бы одно дифференциальное уравнение и 1 раз в противном случае.

:= разностное уравнение (алгебраическое выражение с начальными условиями). Вычисляется всегда 1 раз на каждом шаге. Начальные условия, как и для дифференциальных уравнений, должны быть заданы. Следует использовать для задания разностных уравнений. Для шага больше, чем модельный, следует использовать функции 'экстраполятор' или 'квант по времени'.

(?)= функциональное алгебраическое выражение. Аналогично функции одной переменной и имеет формальный параметр-аргумент, который в правой части должен быть обозначен знаком ?. Использование аналогично функции с одним аргументом.

;0= неявная функция. Переменная левой части вычисляется как численное решение системы всех уравнений данного типа на каждом шаге. Тем самым задает неявную функциональную зависимость переменных левой части от переменных остальных типов.

#= комплекснозначное алгебраическое выражение. Вычисляется аналогично алгебраическому выражению. Значение такого уравнения не может быть выведено в протокол или на график и может быть использовано только в аналогичных уравнениях и внутри функций Re , Im , Abs , Arg , $Argum$ в выражениях других типов. Мнимая единица обозначена буквой i .

При загрузке новой модели из файла существующая модель не удаляется, а уравнение (выражение), идентификатор переменной которого совпадает с имеющимся в текущей модели замещает собой одноименное уравнение. При этом тип может измениться. Загрузка функций производится аналогично. Шаг моделирования, запоминания точек и вычисления производной соответствуют последней загруженной модели. Вычисленные значения заносятся в буфер и после моделирования доступны для построения графиков или вывода в протокол. При изменении уравнения через окно редактирования буфер опустошается.

РЕДАКТИРОВАНИЕ ПРАВОЙ ЧАСТИ УРАВНЕНИЯ

Разделитель обозначает тип уравнения.

Тип уравнения разделитель:

дифференциальное уравнение '=

алгебраическое выражение ==

комплекснозначное алгебраическое выражение #=

разностное уравнение :=

функциональное алгебраическое выражение (?)=

неявная функция ;0=

Справа от разделителя задается правая часть уравнения либо обычным редактированием строки, либо скоростным набором: при выборе функции, числа или переменной она подставляется в правую часть. В меню под строкой правой части присутствуют наряду со встроенными функциями переменные и функции, заданные пользователем, поэтому рекомендуется до редактирования правой части задать переменные и функции. Синтаксический анализ производится перед моделированием, поэтому допустимо указание в правой части еще не заданных переменных или функций.

Перед моделированием в правой части не должно быть знаков ? за исключением правых частей функциональных выражений. Обратите внимание: в таких уравнениях не должно быть функций, зависящих от предыстории (запаздывание, экстраполятор, люфт, динамическое реле и т.п.) за исключением случая, когда функциональное соотношение вызывается только 1 раз. Функции, для задания которых требуется определить хотя бы один параметр, должны быть заданы пользователем под уникальными именами. Производные, заданные в правых частях, вычисляются численно с шагом, заданным как произведение шага моделирования и шага вычисления производной.

Значение комплекснозначного алгебраического выражения может быть использовано только в аналогичных выражениях и внутри функций Re, Im, Abs, Arg, Argum в уравнениях (выражениях) других типов. В комплекснозначных выражениях нельзя вызывать параметрические функции - нелинейности. Следует подставлять результат их использования в вещественные алгебраические выражения. Мнимая единица обозначена i . Функция Arg приводит аргумент к основному периоду, а функция Argum вычисляет аргумент, исходя из непрерывности результата.

Комментарии в выражении начинаются с // и продолжаются до конца выражения. Комментарием считается часть выражения, заключенная между /* и */.

Начальные условия, минимальное и максимальное значения переменной могут быть заданы как числом, так и выражением, аналогичным правой части алгебраического выражения. Эти величины имеют смысл только для дифференциальных уравнений, алгебраических и комплексных выражений. Если какое-либо ограничение не указано, оно не проверяется. Если не указано начальное значение, за начальное принимается значение правой части выражения. Для

неявных функций минимум и максимум определяют диапазон численного поиска значений переменных. Поиск прекращается, когда диапазон уменьшается на 10 порядков, поэтому чем он меньше, тем точнее решение.

Текущая строка подстановки определяется маркером перед именем строки.

ФУНКЦИИ С ПАРАМЕТРАМИ

Если функциональный элемент, например, экстраполятор, требует для определения параметра (в примере - такт дискретизации по времени), следует определить пользовательскую функцию, связав ее имя, заданное пользователем, с уникальным набором параметров, перечень которых и способ задания указываются при выборе типа.

Кусочно-линейная функция может быть задана с разрывами. Следует указать число узлов. Дополнительные две точки задаются для задания функции на бесконечности. Для задания непрерывной функции требуется дублировать значение функции в узле.

Функция Двухзначность требует задания имен функциональных соотношений, по которым вычисляются значения функции при возрастании и убывании аргумента.

Значение функции Диапазон равно 1, если аргумент принадлежит заданному диапазону, иначе 0 (левая граница входит в диапазон, правая - нет).

Квант по времени заменяет непрерывный аргумент решетчатой функцией. Настоятельно рекомендуется выбирать шаг моделирования кратным всем тактам дискретизации в системе и временам запаздывания.

Динамические реле - реле с ненулевым временем переключения.

Случайные величины складываются со своим аргументом. Нормальный закон распределения в полосе формируется с использованием формирующего фильтра по одной случайной величине на шаг интегрирования, остальные случайные функции выдают новую случайную величину при каждом обращении.

При определении функций Бесселя задается целое число - порядок функции.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ

Решение уравнений производится с постоянным шагом. Перед первым шагом вычисляются 1) алгебраические выражения, неявные функции (если имеются), 2) алгебраические выражения. На каждом шаге обращения к правой части производятся в следующем порядке: дифференциальные уравнения, разностные уравнения, неявные функции, алгебраические выражения. В буфер заносятся точки на шагах, номер которых кратен заданной величине. Первая и последняя точки заносятся всегда. Проверку выхода за заданный диапазон можно отключить для повышения быстродействия (не рекомендуется). После проведения моделирования полученные значения можно посмотреть в численной (Протокол) или графической форме.

ГРАФИКИ

При обращении к меню графиков создается новое окно. Для вызова меню свойств существующего окна отображения графиков следует на его поле нажать правую кнопку мыши. С использованием этого меню в окно можно добавить новый график как из буфера, так и из файла, изменить параметры отображения уже построенных графиков и координатной сетки, скопировать графическое изображение построенного поля в файл или буфер обмена и т.п.

Выбор значений переменных для построения нового графика по абсциссе и ординате производится из буфера. Если включено автоопределение диапазона, минимум, максимум и

шаг координатной сетки будут пересчитываться в сторону увеличения для каждого нового графика.

Если требуется изменить цвет, толщину уже построенного графика, сохранить его в виде таблицы в файле или удалить, следует выбрать его из списка, именуемого 'применить к'. Если поле пусто - команда игнорируется. Для формирования диапазона отображения по заданному уже построенному графику следует сбросить диапазон и выбрать его в списке 'применить к'. Отключение автоопределения границ позволяет отображать фрагменты графиков.

Возможна загрузка графика из файла, в том числе и из таблицы протокола.

Область просмотра можно изменить мышью при нажатой левой кнопке. Дополнительно нажав Ctrl, можно изменить масштаб. Масштаб можно изменить и колесом мыши. Шаг сетки мышью изменяется при нажатой Alt.

РАЗЛОЖЕНИЕ В РЯД ФУРЬЕ

Функция, представленная графиком, может быть разложена в тригонометрический ряд Фурье. В окне редактирования свойств графиков следует выбрать уже построенный график. Анализ возможен только для графиков, аргумент которых строго возрастает. Отрезок разложения определяется автоматически, но может быть задан вручную. Количество гармоник в разложении ограничено дискретизацией аргумента графика и не может превышать 10000. Вычисленная частичная сумма ряда Фурье может быть представлена графиком. При необходимости пользователь может внести изменения в вычисленные параметры, сохранить их в файле и затем восстановить.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Указания к лабораторным занятиям

Лабораторный практикум включает 3 работы, объединенные общим вариантом задания. По каждой работе оформляется отчет с титульным листом, описанием полученных результатов и заключением. Работы объединены одним вариантом системы, на примере которого изучаются численные и аналитические методы анализа и синтеза дискретно-непрерывных САУ. Практикум выполняется с использованием программы Sinus.exe. Важно следить, какой шаг моделирования выбирает студент и как он соотносится с тактом дискретизации, а также за соответствием структурной схемы и системы дифференциальных и разностных уравнений.

1. Исследование влияния квантования по времени и экстраполятора на переходные процессы дискретно-непрерывной системы.

2. Исследование устойчивости дискретно-непрерывной системы.

3. Синтез цифрового корректирующего устройства в дискретно-непрерывной системе.

Автор(ы):

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

