

Методические указания
по Отраслевой студенческой олимпиаде «Газпром»,
профиль «Управление в технических системах»

Учебное пособие для подготовки к олимпиаде
(этап I)

Под редакцией д.т.н. профессора Душина С.Е.

Санкт-Петербург

2019

ВВЕДЕНИЕ

Цель проведения отраслевой олимпиады «Газпром» – выявление талантливых студентов, обучающихся по направлению «Управление в технических системах» подготовки бакалавров и магистров, способных продолжить обучение в магистратуре, аспирантуре и/или осуществлять профессиональную деятельность на предприятиях ПАО «Газпром».

Область профессиональной деятельности выпускников по направлению «Управление в технических системах» – проектирование, исследование, производство и эксплуатация систем и средств управления в различных отраслях промышленности, в том числе в нефтегазовой отрасли, а также создание современных программных и аппаратных средств исследования и проектирования, контроля, технического диагностирования и промышленных испытаний систем автоматического и автоматизированного управления, включая предприятия Газпрома.

Объектами профессиональной деятельности выпускников по направлению «Управление в технических системах» являются системы автоматизации, управления, контроля, технического диагностирования и информационного обеспечения, методы и средства их проектирования, моделирования, экспериментального исследования, эксплуатации и техническое обслуживание оборудования на действующих объектах.

Основу базовой подготовки специалистов по направлению «Управление в технических системах» составляют такие учебные дисциплины, как: «Теория автоматического управления» и «Моделирование объектов и систем управления». Эти дисциплины обеспечивают большинство общепрофессиональных и профессиональных компетенций Федеральных государственных образовательных стандартов подготовки бакалавров и магистров по направлению «Управление в технических системах». К их числу можно отнести: способность представлять адекватную современному уровню знаний картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики; способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физикоматематический аппарат; способность выполнять эксперименты на действующих объектах по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных технологий и технических средств; способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с

целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления; способность формулировать цели, задачи научных исследований в области автоматического управления, выбирать методы и средства решения задач; способность выбирать методы и разрабатывать алгоритмы решения задач управления в технических системах; способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования систем и средств автоматизации и управления; способность производить расчеты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления и выбирать стандартные средства автоматики, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления в соответствии с техническим заданием; способность применять современные теоретические и экспериментальные методы разработки математических моделей исследуемых объектов и процессов, относящихся к профессиональной деятельности по направлению подготовки; способность применять современные методы разработки технического, информационного и алгоритмического обеспечения систем автоматизации и управления; способность к организации и проведению экспериментальных исследований и компьютерного моделирования с применением современных средств и методов; готовность к внедрению результатов разработок средств и систем автоматизации и управления в производство; готовность к участию в работах по изготовлению, отладке и сдаче в эксплуатацию систем и средств автоматизации и управления; способность настраивать управляющие средства и комплексы и осуществлять их регламентное эксплуатационное обслуживание с использованием соответствующих инструментальных средств; способность применять современный инструментарий проектирования программно-аппаратных средств для решения задач автоматизации и управления.

ДИСЦИПЛИНА «ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»

Аннотация дисциплины «Теория автоматического управления»

Основные понятия теории управления. Линейные модели и характеристики систем управления. Анализ и синтез линейных систем управления. Общие сведения о дискретных системах автоматического управления. Модели дискретных систем управления. Анализ и синтез цифровых и импульсных систем управления. Нелинейные модели систем управления. Анализ равновесных режимов. Анализ поведения нелинейных систем на фазовой плоскости. Устойчивость положений равновесия. Исследование периодических

режимов. Общие сведения о случайных процессах. Анализ и синтез линейных систем управления при случайных воздействиях.

Subject summary «Automatic control theory»

Fundamental concepts of automatic control theory. Linear models and characteristics of control systems. Analysis and synthesis of linear control systems. General information on discrete control systems. Models of linear discrete control systems. Analysis and synthesis of digital and impulse control systems. Nonlinear models of control systems. Equilibrium state analysis. Analysis of nonlinear systems behaviour on the phase plane. Equilibrium position stability. Periodic mode analysis. General information on random processes. Analysis and synthesis of linear control systems under random disturbance.

Цели и задачи дисциплины

1. Изучение принципов управления, форм представления математических моделей объектов и систем управления, знание методов анализа и синтеза систем автоматического управления по линейным и нелинейным непрерывным и дискретным моделям при детерминированных и стохастических воздействиях.

2. Формирование умений исследования систем автоматического управления с помощью современных инструментальных средств.

3. Освоение практических навыков, закрепляющих теоретические знания о методах расчета систем управления.

Содержание дисциплины

Введение

Цели и задачи теории управления. Понятия об управлении и системах управления. Примеры технических и нетехнических объектов управления. Поведение объектов и систем управления. Информация и принципы управления. Типовые структуры систем управления. Алгоритмы управления в системах с обратной связью. Классификация систем управления по цели управления, типу сигналов — носителей информации и по энергетическому признаку. Общие сведения о способах построения моделей объектов и систем управления. Классы операторов преобразования переменных. Модели систем управления с нетиповой и иерархической структурой.

Линейные модели и характеристики непрерывных систем управления

Модели вход-выход: дифференциальные уравнения; передаточные функции; временные и частотные характеристики. Модели вход-состояние-выход. Взаимосвязь форм представления моделей: взаимосвязь между дифференциальным уравнением и передаточной функцией; получение передаточной функции и дифференциального уравнения по модели в форме пространства состояний; переход от дифференциального уравнения к форме пространства состояний. Построение временных и частотных характеристик. Типовые динамические звенья. Системы уравнений, структурные схемы и сигнальные графы. Характеристики систем управления с типовой и нетиповой структурой. Правило Крамера и формула Мэсона (Мэйсона). Полнота характеристик, управляемость и наблюдаемость систем управления. Критерии управляемости и наблюдаемости. Принцип дуальности. Получение канонических форм моделей: наблюдаемой, управляемой, диагональной. Модели систем с элементами запаздывания.

Анализ систем управления

Задачи анализа систем управления. Устойчивость по начальным условиям, устойчивость по входу-выходу. Условие устойчивости линейных стационарных систем. Критерий устойчивости Гурвица. Диаграмма Вышнеградского. Принцип аргумента. Критерий Михайлова. Устойчивость систем с типовой структурой. Критерий Найквиста. Особенности применения критерия Найквиста. Метод корневого годографа. Инвариантность систем управления. Формы инвариантности. Селективная инвариантность к степенным и гармоническим воздействиям. Инвариантность систем с типовой структурой. Чувствительность систем управления. Функции чувствительности. Чувствительность систем с типовой и произвольной структурой. Анализ качества свободных, вынужденных и установившихся процессов управления. Анализ устойчивости систем с элементами запаздывания.

Синтез систем управления

Задачи синтеза систем управления. Стабилизация неустойчивых объектов управления, представленных в форме дифференциального уравнения. Метод стандартных коэффициентов. Стабилизация объекта управления по модели в форме пространства состояний. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов. Метод размещения собственных значений. Синтез наблюдателя состояний. Синтез следящих систем по

требованию к точности воспроизведения задающего воздействия: степенного, гармонического. Коррекция систем управления. Метод динамической компенсации.

Анализ линейных систем управления при случайных воздействиях

Случайные воздействия. Преобразование случайного сигнала линейным звеном. Анализ объекта и замкнутой системы управления при случайных воздействиях. Способы вычисления дисперсии случайного сигнала. Использование идеального белого шума в качестве модели среды. Понятие о формирующем фильтре.

Синтез линейных систем управления при случайных воздействиях

Постановка задачи синтеза. Синтез оптимальной системы с заданной структурой. Синтез оптимальной системы с произвольной структурой: интегральное уравнение Винера–Хопфа. Определение оптимальной передаточной функции фильтра Винера с учетом физической реализуемости. Синтез оптимальной системы в пространстве состояний. Фильтр Калмана–Бьюси.

Общие сведения о цифровых и импульсных системах управления

Цифровые и импульсные системы управления. Примеры дискретных систем и объектов. Дискретно-событийные системы. Классификация систем по виду квантования сигналов по уровню и дискретизации во времени. Структурные схемы импульсных и цифровых автоматических систем.

Линейные дискретные модели цифровых и импульсных систем управления

Числовые последовательности и разностные уравнения. Примеры. Z-преобразование и его свойства. Дискретная передаточная функция. Модели дискретных систем в пространстве состояний. Однородные дискретные и непрерывные модели цифровых систем управления.

Анализ цифровых и импульсных систем управления

Устойчивость дискретных систем. Критерии устойчивости. Решение разностных уравнений и анализ процессов в цифровых и импульсных системах управления. Особенности временных и частотных характеристик дискретных систем. Установившиеся процессы в дискретных системах управления.

Синтез цифровых и импульсных систем управления

Особенности синтеза цифровых и импульсных систем. Методы синтеза по дискретным моделям. Стабилизация неустойчивых объектов управления. Синтез регулятора и наблюдателя состояний. Синтез дискретных систем по требованию к точности воспроизведения задающего воздействия и подавления возмущений. Выбор периода дискретизации времени в системах цифрового управления непрерывными объектами.

Нелинейные модели систем управления

Необходимость в нелинейных моделях. Безынерционные и динамические нелинейные элементы. Нелинейные модели с раскрытой структурой. Расчетные формы нелинейных моделей.

Анализ равновесных режимов

Равновесные режимы. Анализ равновесных режимов по дифференциальным уравнениям и структурным схемам. Построение статических характеристик систем с типовой и произвольной структурой.

Анализ поведения систем на фазовой плоскости

Метод фазовой плоскости. Поведение нелинейных систем в окрестности положений равновесия. Методы построения фазовых портретов. Особенности фазовых портретов нелинейных систем.

Устойчивость положений равновесия

Понятие об устойчивости невозмущенного движения. Первый метод Ляпунова. Второй (прямой) метод Ляпунова. Применение второго метода. Частотный метод исследования абсолютной устойчивости. Круговой критерий.

Исследование периодических режимов методом гармонического баланса

Основные положения приближенного метода гармонического баланса. Гармоническая линеаризация (эквивалентирование) нелинейного элемента. Способы вычисления коэффициентов гармонической линеаризации. Методики определения параметров периодических режимов. Устойчивость периодических режимов.

Синтез нелинейных систем

Особенности синтеза нелинейных систем. Синтез по требованиям к положениям равновесия. Синтез по линеаризованным моделям. Примеры синтеза методом фазовой плоскости. Примеры синтеза прямым методом Ляпунова. Синтез с помощью критерия абсолютной устойчивости. Синтез на основе метода гармонического баланса.

ДИСЦИПЛИНА «МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ»

Аннотация дисциплины «Моделирование объектов и систем управления»

Основные понятия моделирования, принципы построения и исследования систем по математическим моделям, схема построения математических моделей. Введение в теорию подобия, применение преобразования подобия при моделировании. Представление моделей в форме уравнений Лагранжа и Гамильтона. Консервативные и диссипативные системы. Метод балансовых соотношений. Представление математических моделей систем управления по степени информативности. Методы анализа статических и динамических режимов моделей систем управления с сосредоточенными параметрами. Методы анализа моделей систем управления с распределёнными параметрами.

Subject summary «Modeling of objects and control systems»

Basic concepts of modeling, principles of system design and analysis using mathematical models, scheme of mathematical models construction. Introduction to the similarity theory, application of similarity transformation in modeling. Model presentation in the form of Lagrange equation and Hamilton equation. Conservative and dissipative systems. Methods of balance relations. Mathematical models of control systems presentation according to the degree of information. Analysis methods of static and dynamical operation modes of control systems with lumped parameters. Methods of analysis of control systems with distributed parameters.

Цели и задачи дисциплины

1. Изучение основных принципов построения математических моделей, знание методов, необходимых при создании систем и средств автоматизации и управления.
2. Формирование навыков проведения вычислительных экспериментов при разработке математических моделей систем и средств автоматизации и управления с использованием современных программных средств, умение использовать современные методы

математического моделирования при разработке систем и средств автоматизации и управления.

3. Освоение методов численного моделирования процессов в объектах и системах управления, владение навыками математического моделирования с применением современных компьютерных средств при проектировании объектов и систем управления различной природы.

Содержание дисциплины

Введение

Основные понятия и определения. Понятие моделирования: объект моделирования; модель, её назначение и функции; частные модели. Роль модели в процессе познания. Натурный (физический) и вычислительный эксперименты, их достоинства и недостатки. Полунатурное моделирование.

Модели и моделирование

Принципы построения и исследования математических моделей. Общая схема разработки математических моделей систем управления. Этапы математического моделирования. Основные требования к математическим моделям. Способы построения математических моделей: аналитический, экспериментальный (идентификация). Физические аналогии.

Введение в теорию подобия

Изоморфные модели. Преобразование подобия. Константы подобия. Прямая (первая) теорема подобия. Критерии подобия. Преобразование подобия для моделей, представленных дифференциальными уравнениями. Применение преобразования подобия при моделировании.

Представление моделей систем в форме уравнений Лагранжа

Получение уравнений Лагранжа на основе принципа Гамильтона. Модели консервативных и диссипативных систем.

Представление моделей систем в форме уравнений Гамильтона. Консервативные и диссипативные системы

Получение канонических уравнений Гамильтона. Свойство гамильтониана для консервативных систем. Сжатие фазового «объёма» диссипативных систем; дивергенция вектора фазовой скорости. Свойства диссипативных систем.

Метод балансовых соотношений

Принцип балансовых соотношений. Баланс массы (вещества). Использование принципа балансовых соотношений для моделей нетехнической природы: модель гонки вооружений; модель распространения эпидемического заболевания; модель обмена потребительскими стоимостями. Логистические модели (модели Мальтуса и Ферхюльстера). Модель промышленного рыболовства.

Представление математических моделей систем управления по степени информативности

Частные и обобщённые модели систем управления. Ранги неопределённости причинноследственных отношений моделей. Модели систем управления 1-го (топологического) ранга неопределённости. Теоретико-множественная (теоретико-графовая) форма представления: основные понятия теории графов; неориентированные и ориентированные гиперграфы; примеры. Алгебраическая (матричная) форма представления (матрицы смежности, инцидентности, изоморфности). Пример определения контуров графа с помощью матрицы смежности.

Модели систем управления 2-го и 3-го (структурно-операторного и параметрического) рангов неопределённости. Модели внешней среды. Модели связей системы со средой. Модели смешанных рангов неопределённости.

Представление моделей в форме пространства состояний. Нормальная форма Коши. Общее и частное решения. Условия существования и единственности решений дифференциальных уравнений. Примеры.

Разнообразие форм представления моделей «вход-состояние-выход»: линейные; билинейные; аффинные. Первый интеграл и его свойства.

Представление моделей в форме системы дифференциальных уравнений различных порядков.

Методы анализа статических (равновесных) режимов моделей систем управления

Задачи и основные проблемы при анализе статики на ЭВМ. Численные методы анализа статики: метод установления, итерационные методы. Каноническая форма представления итерационного метода. Метод релаксации и его геометрическая интерпретация. Метод Ньютона и его геометрическая интерпретация. Модификации метода Ньютона. Контроль сходимости метода Ньютона. Нелинейные и гибридные итерационные методы. Повышение надёжности сходимости итерационных методов.

Методы анализа динамических (переходных) режимов моделей систем управления с сосредоточенными параметрами

Численные методы анализа моделей с сосредоточенными и распределёнными параметрами; дискретизация и континуализация; пример модели системы с «обострением» процесса. Задачи анализа динамики и основные понятия методов численного моделирования: сетка; сходимость в точке и на отрезке; порядок точности; погрешность аппроксимации разностного уравнения; порядок погрешности аппроксимации. Явные и неявные методы.

Методы Рунге–Кутты. Двухэтапные методы (метод предиктора-корректора). Явный трёхэтапный метод Рунге–Кутты.

Многошаговые разностные методы: явные m -шаговые методы Адамса –Бэшворта; неявные m -шаговые методы Адамса–Мултона. Устойчивость многошаговых разностных методов. Условно устойчивые и абсолютно устойчивые разностные методы.

Жёсткие модели систем управления, их особенности. Критерии жёсткости для стационарных и нестационарных линейных и нелинейных моделей. Чисто неявные разностные методы (m -шаговые методы Гира). Погрешности моделирования систем управления численными методами.

Особенности дискретизации при численном моделировании

Квантование процесса. Интерполяционный полином Лежандра. Обоснование выбора шага дискретизации на основе неравенства С.Н. Бернштейна.

Методы анализа моделей систем управления с распределёнными параметрами

Особенности моделей систем с распределёнными параметрами. Модели систем управления с распределёнными параметрами в форме канонического линейного дифференциального уравнения 2-го порядка. Классификация уравнений: эллиптические;

параболические; гиперболические. Примеры уравнений эллиптического типа: Лапласа; Пуассона; Гельмгольца. Примеры уравнений параболического типа: процессы теплопередачи; диффузии. Примеры уравнений гиперболического типа: волновые процессы.

Нелинейные уравнения: изгиб балки переменной жёсткости; уравнение Кортевега–де Вриза. Краевые задачи: задача Дирихле; задача Неймана; задача смешанного типа.

Модели процессов распространения тепла в объектах управления. Передаточные функции полузапаздывающего (с распределённым запаздыванием), полуинтегрирующего и полуинерционного звеньев.

Численные методы анализа динамики моделей систем управления с распределёнными параметрами (на примере уравнения теплопроводности)

Основные понятия: пространственно-временная сетка; внутренние и граничные узлы; слой. Четырёхточечный шаблон. Послойное решение. Условия устойчивости. Чисто неявная разностная схема. Шеститочечный шаблон.

Хаотические модели

Детерминированные, случайные и хаотические процессы (детерминированный хаос). Колебательные процессы в линейных и нелинейных моделях: гармонические и полигармонические, периодические и квазипериодические (почти периодические) колебания; предельные циклы. Основные признаки хаотического поведения.

Определения аттрактора, странного аттрактора, хаотической модели. Инвариантное множество. Сверхчувствительность к начальным данным. Примеры хаотических моделей.

Заключение

Тенденции и перспективы развития методов и средств моделирования систем. Современные проблемы моделирования систем различной природы.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Дисциплина «Теория автоматического управления»

1. Теория автоматического управления. Учебник для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; под ред. проф. В.Б. Яковлева. М. Высш. шк., 2003, 2005, 2009.
2. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999.

3. Ким Д.П. Теория автоматического управления: Учеб. пособие. М.: Физматлит. Т. 1. Линейные системы. 2003. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2004.
4. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы: Учебное пособие. СПб.: Питер, 2005. Нелинейные и оптимальные системы. СПб.: Питер, 2006.
5. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2004.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Профессия. 2004, 2007.
7. Теория автоматического управления: Учеб. пособие в 2-х частях / М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина; под ред. проф. В.И. Лачина. Новочеркасск: УВД ЮРГТУ, 2004.
8. Певзнер Л.Д. Теория систем управления: Учеб. пособие. М. Изд-во МГГУ, 2002.
9. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления. М.: Высш. шк., 2006.
10. Лурье Б.Я., Энрайт П.Дж. Классические методы автоматического управления / Под ред. А.А. Ланнэ. СПб: БХВ-Петербург, 2004.
11. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаб. базовых знаний, 2001.
12. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаб. базовых знаний, 2002.
13. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: Учеб. пособие для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.

Дисциплина «Моделирование объектов и систем управления»

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001.
2. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2003.
3. Душин С.Е., Красов А.В., Кузьмин Н.Н. Моделирование систем управления: Учеб. пособие. М.: ТИД ООО «Студент», 2012.
4. Душин С.Е., Красов А.В., Литвинов Ю.В. Моделирование систем и комплексов: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО. 2010.
5. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учебник для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ, 2003.

6. Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие / Под ред. П.В. Трусова. М.: Логос, 2005.
7. Бордовский Г.А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д.Р. Физические основы математического моделирования: Учеб. пособие. М.: Изд. центр «Академия», 2005.
8. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей: Учеб. пособие: М.: ФАЗИС, ВЦРАН, 2000.
9. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для академ. бакалавриата. М.: Изд-во Юрайт, 2015.
10. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: Учеб. пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2006.
11. Тарасевич Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование. Вводный курс: Учеб. пособие. М.: Эдиториал УРСС, 2001.
12. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой: Учеб. пособие. М., Ижевск. Институт компьютерных исследований, 2002.
13. Веригин А.Н., Вареных Н.М., Джангирян В.Г. Химико-технологические агрегаты. Инженерный анализ колебаний: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во «Менделеев», 2004.
14. Мэтьюс Дж. Г., Финк К. Д. Численные методы. Использование MATLAB. М.: Изд. Дом «Вильямс», 2001.
15. Решетникова Г.Н. Моделирование систем. Учеб. пособие. Томск: Изд-во ТУСУР, 2005, 2008.
16. Морозов В.К., Рогачев Г.Н. Моделирование процессов и систем. М.: Изд. центр «Академия», 2015.
17. Маликов Р.Ф. Основы математического моделирования: Учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2010.