

А. Ю. ОЩЕПКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Издание второе, стереотипное



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР

2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ | 9 |
| ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ: СВОЙСТВА, МОДЕЛИ, ПРОЕКТЫ | 9 |
| 1.1. Системный подход и системный анализ | 9 |
| 1.2. Триада компьютерного математического моделирования | 14 |
| 1.3. Моделирование динамических систем | 16 |
| 1.4. Модельно-ориентированное проектирование | 21 |
| ГЛАВА 2. СТРУКТУРА И ПРИМЕРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ | 26 |
| 2.1. Структура систем автоматического управления | 26 |
| 2.2. Регуляторы прямого действия и регуляторы по отклонению | 29 |
| 2.3. Современные цифровые системы автоматического управления | 34 |
| 2.4. Математическая формулировка задач управления поворотом вала электродвигателя | 36 |
| ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ В ФОРМЕ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ И В ФОРМЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ | 44 |
| 3.1. Математическая модель RLC-цепи | 44 |
| 3.2. Пространство состояний и сигнальные графы. Управляемость и наблюдаемость систем | 46 |
| 3.3. Передаточные функции и структурные схемы | 50 |
| 3.4. Связь между передаточными функциями и уравнениями состояния | 54 |
| ГЛАВА 4. ПРИМЕРЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЛИНЕЙНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ | 58 |
| 4.1. Модель двигателя постоянного тока | 58 |
| 4.2. Двигатель, управляемый по цепи возбуждения | 59 |
| 4.3. Двигатель, управляемый по цепи якоря | 61 |
| 4.4. Переходные характеристики систем управления | 63 |
| ЧАСТЬ ВТОРАЯ. УСТОЙЧИВОСТЬ НЕПРЕРЫВНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ | 66 |
| ГЛАВА 5. УСТОЙЧИВОСТЬ НЕПРЕРЫВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ | 66 |
| 5.1. Понятие устойчивости | 66 |
| 5.2. Математическая устойчивость. Основные определения | 68 |
| 5.3. Теоремы устойчивости | 70 |
| 5.4. Устойчивость вращения твердого тела | 72 |
| ГЛАВА 6. УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ | 76 |
| 6.1. Методы анализа устойчивости ЛСС | 76 |
| 6.2. Анализ устойчивости во временной области | 78 |
| 6.3. Частотные критерии устойчивости | 83 |
| 6.4. Устойчивость систем с неопределенными параметрами | 86 |
| ГЛАВА 7. ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ | 88 |
| 7.1. Структура цифровых систем управления | 88 |
| 7.2. Дискретные модели непрерывных систем | 91 |
| 7.3. Передаточные функции дискретных систем | 94 |
| 7.4. Устойчивость дискретных систем | 97 |

| | |
|--|-----|
| ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. УПРАВЛЕНИЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ | 99 |
| ГЛАВА 8. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ | 99 |
| 8.1. Свойства обратной связи..... | 99 |
| 8.2. Постановка задач управления в технических системах..... | 102 |
| 8.3. Примеры систем слежения и стабилизации | 104 |
| 8.4. Показатели и оценки качества | 109 |
| ГЛАВА 9. СТАНДАРТНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ И МЕТОДЫ ИХ НАСТРОЙКИ | 114 |
| 9.1. Математические модели ПИД-регуляторов..... | 114 |
| 9.2. Особенности работы ПИД-регуляторов | 117 |
| 9.3. Методы настройки ПИД-регуляторов | 123 |
| ГЛАВА 10. РАЗОМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ..... | 128 |
| 10.1. Постановка и классификация задач оптимального управления..... | 128 |
| 10.2. Вариационный метод для скалярного случая | 131 |
| 10.3. Гамильтонова формулировка условия оптимальности..... | 134 |
| 10.4. Оптимальное управление линейными системами с квадратичным функционалом..... | 137 |
| 10.5. Управление на неограниченном интервале времени | 143 |
| ГЛАВА 11. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ | 146 |
| 11.1. Принцип максимума Понтрягина..... | 146 |
| 11.2. Пример: поворот вала электродвигателя на максимальный угол..... | 147 |
| 11.3. Метод динамического программирования. Уравнение Беллмана..... | 151 |
| 11.4. Пример: задача об успокоении твердого тела..... | 154 |
| ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ. УПРАВЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ..... | 157 |
| ГЛАВА 12. РОБАСТНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ..... | 157 |
| 12.1. Неопределенности объектов управления | 157 |
| 12.2. Понятие грубости и робастности систем управления..... | 159 |
| 12.3. Робастность систем управления с обратной связью | 160 |
| 12.4. Метод скоростного градиента | 163 |
| ГЛАВА 13. АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ | 166 |
| 13.1. Структура адаптивных систем управления | 166 |
| 13.2. Классификация адаптивных систем управления | 167 |
| 13.3. Адаптивное управление с эталонной моделью объектом первого порядка | 170 |
| ГЛАВА 14. РОБАСТНЫЕ И АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ..... | 175 |
| 14.1. Градиентный метод..... | 175 |
| 14.2. Быстрые алгоритмы для объектов первого и второго порядков..... | 178 |
| 14.3. Идентификационное адаптивное управление объектом первого порядка на основе методов линейной регрессии | 181 |
| ЧАСТЬ ПЯТАЯ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ..... | 185 |
| ГЛАВА 15. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ..... | 185 |
| 15.1. Понятие об искусственном интеллекте | 185 |
| 15.2. Направления использования и алгоритмы работы систем искусственного интеллекта..... | 186 |

| | |
|--|------------|
| 15.3. Структура интеллектуальных систем управления. Пример | 189 |
| ГЛАВА 16. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ | |
| С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ | 194 |
| 16.1. Принцип несовместимости, лингвистические переменные и нечеткие регуляторы | 194 |
| 16.2. Нечеткие алгоритмы | 197 |
| 16.3. Синтез системы управления с нечеткой логикой | 202 |
| 16.4. Модель нечеткого управления посадкой беспилотного летательного аппарата..... | 207 |
| ГЛАВА 17. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ | |
| С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ..... | 212 |
| 17.1. Биологический нейрон и искусственный нейрон | 212 |
| 17.2. Структура и стратегии обучения искусственных нейронных сетей..... | 214 |
| 17.3. Схемы применения нейронных сетей в системах управления динамическими объектами | 218 |
| 17.4. Применение нейросетей для управления траекторией движения манипулятора..... | 223 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ | |
| УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ..... | 227 |
| Пример 1. Автоматизированная робастная система управления технологическим процессом..... | 227 |
| Пример 2. Моделирование системы стабилизации состояний квантовых двухуровневых систем | 230 |
| Пример 3. Оптимизация поглощения микроволнового излучения макромолекулами..... | 238 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 244 |