

А. Ю. ОЩЕПКОВ

Математическое и компьютерное моделирование
современных систем автоматического управления

Учебное пособие для вузов и инженерных вузов

Составлено на основе лекций по курсу «Математическое и компьютерное моделирование современных систем автоматического управления»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Издание второе, стереотипное

Санкт-Петербургский политехнический университет им. Ю. А. Гагарина

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения им. В. Г. Курчатова

Санкт-Петербургский государственный университет ядерной физики и прикладной радиотехники

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций и радиоэлектроники

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

Санкт-Петербургский государственный университет транспорта

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

Санкт-Петербургский государственный университет ядерной физики и прикладной радиотехники

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики



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	46
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 НВОПРЕДЕЛЕННОСТИ	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. ИССКУСТВЕННЫЙ 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