

ТЕОРИЯ
АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ
(С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
MATLAB — SIMULINK)

MATLAB®
& SIMULINK®



Ю. И. Кудинов
Ф. Ф. Пащенко



Ю. И. КУДИНОВ,
Ф. Ф. ПАЩЕНКО

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЛАВ — SIMULINK)

Издание четвертое, исправленное и дополненное

РЕКОМЕНДОВАНО

*УМО вузов РФ по образованию в области прикладных математики и физики
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению
«Прикладные математика и физика», а также по другим математическим
и естественнонаучным направлениям и специальностям и смежным направлениям
и специальностям в области техники и технологий*



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР
2021

УДК 681.5.01
ББК 32.98я73

К 88 Кудинов Ю. И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) : учебное пособие для вузов / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пащенко. — 4-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 308 с. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-8114-5520-1

В пособии рассматриваются современные методы анализа и синтеза систем управления типа «вход — выход» и «вход — выход — состояние» с привлечением программного средства MATLAB — SIMULINK. Излагаемый материал сопровождается большим числом примеров и программ на MATLAB, существенно облегчающих освоение теории автоматического управления.

Предназначено для бакалавров, магистров и аспирантов, обучающихся по направлениям «Прикладная математика и физика» и «Управление в технических системах».

УДК 681.5.01
ББК 32.98я73

Рецензенты:

Н. А. КУЗНЕЦОВ — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Инфокоммуникационные системы и сети» Московского физико-технического института, академик РАН;
Д. Ю. МУРОМЦЕВ — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета.

Обложка

Ю. В. ГРИГОРЬЕВА

© Издательство «Лань», 2021
© Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пащенко, 2021
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	5
1.1. Основные понятия и определения	6
1.2. Объекты управления	6
1.3. Классификация систем управления	8
1.3.1. Классификация по типу сигнала	9
1.3.2. Классификация по виду связи между входом и выходом	10
1.3.3. Классификация по принципу управления	11
1.3.4. Классификация по цели управления	15
1.3.5. Классификация по виду дифференциального уравнения	16
1.4. Задачи теории управления	17
2. ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	19
2.1. Дифференциальные уравнения объектов типа «вход – выход»	19
2.1.1. Линеаризация дифференциальных уравнений	20
2.1.2. Механические объекты	22
2.1.3. Электрические объекты	24
2.1.4. Тепловой объект	26
2.1.5. Гидравлические объекты	27
2.1.6. Классический метод решения дифференциального уравнения	29
2.2. Преобразования Лапласа и Фурье	31
2.2.1. Преобразование Лапласа и передаточная функция	31
2.2.2. Передаточные функции структурных схем	34
2.2.3. Решение линейных дифференциальных уравнений с помощью преобразования Лапласа	45
2.2.4. Временные характеристики	49
2.2.5. Преобразование Фурье и частотные характеристики	55
2.3. Типовые динамические звенья	62
2.3.1. Пропорциональное (усилительное) звено	63
2.3.2. Интегрирующее звено	65
2.3.3. Дифференцирующее звено	66
2.3.4. Аperiodическое звено	68
2.3.5. Динамические звенья второго порядка	70
2.3.6. Запоздывающее звено	75
2.3.7. Звенья с распределенными параметрами	79
2.4. Модели объектов и систем типа «вход – состояние – выход»	81
2.4.1. Переменные состояния динамической системы	82
2.4.2. Дифференциальные уравнения состояния	84
2.4.3. Анализ моделей в пространстве состояний	91
2.4.4. Связь передаточной функции с уравнениями состояния	96
3. АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	98
3.1. Задачи анализа	98
3.2. Анализ устойчивости линейных САУ	98
3.2.1. Корневой критерий	99
3.2.2. Алгебраический критерий Гурвица	105
3.2.3. Частотный критерий Михайлова	106
3.2.4. Частотный критерий Найквиста	109
3.3. Инвариантность, ковариантность и чувствительность систем управления	115
3.3.1. Формы инвариантности и ковариантности	115

3.3.2. Инвариантность систем с типовой структурой	117
3.3.3. Чувствительность систем управления	121
3.4. Анализ качества систем управления	122
3.4.1. Прямые показатели качества	123
3.4.2. Косвенные показатели качества	127
3.5. Анализ статических режимов	132
3.5.1. Статические системы	132
3.5.2. Астатические системы	133
3.6. Метод корневого годографа	134
3.6.1. Основные понятия, определения и соотношения метода КГ	135
3.6.2. Построение КГ и его использование для анализа систем управления	140
4. СИНТЕЗ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	142
4.1. Задачи синтеза	142
4.2. Условия разрешимости задачи синтеза	144
4.2.1. Устойчивость «обратного» объекта	144
4.2.2. Управляемость	145
4.2.3. Наблюдаемость	146
4.2.4. Полнота объектов и систем управления	147
4.3. Синтез систем управления объектами типа «вход – выход»	148
4.3.1. Определение параметров ПИД регуляторов по упрощенной модели объекта управления	148
4.3.2. Синтез систем управления с корректирующими звеньями	151
4.3.3. Определение параметров ПИД регуляторов методом КГ	157
4.3.4. Синтез следящей системы	163
4.4. Синтез систем управления в пространстве состояний	166
4.4.1. Модальный метод синтеза системы управления	166
4.4.2. Синтез систем управления с наблюдателем состояния	175
4.4.3. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов	178
5. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	183
5.1. Общие сведения о дискретных системах управления	183
5.1.1. Виды квантования сигналов	183
5.1.2. Виды импульсной модуляции	185
5.1.3. Структурные схемы импульсных САУ	185
5.2. Модели линейных дискретных систем управления	188
5.2.1. Разностные уравнения	189
5.2.2. Z-преобразование и дискретная передаточная функция	191
5.2.3. Решение линейных разностных уравнений с помощью Z-преобразования	197
5.2.4. Временные характеристики	199
5.2.5. Частотные характеристики импульсных систем	202
5.2.6. Представление в пространстве состояний	207
5.3. Устойчивость дискретных систем	213
5.3.1. Анализ устойчивости на z-плоскости	214
5.3.2. Алгебраические критерии устойчивости	216
5.3.3. Критерий устойчивости Джури	219
5.3.4. Частотные критерии устойчивости	221
5.4. Анализ качества дискретных систем управления	223
5.4.1. Показатели качества переходных процессов дискретных систем	224
5.4.2. Запасы устойчивости	227
5.4.3. Установившиеся ошибки	227
5.4.4. Интегральные показатели	228
5.5. Синтез дискретных систем управления	229

5.5.1. Определение параметров дискретных ПИД регуляторов по упрощенной модели объекта управления.....	229
5.5.2. Прямой метод синтеза дискретного регулятора	231
5.5.3. Синтез дискретных компенсаторов и регуляторов методом корневого годографа и оптимизационным методом	235
5.5.4. Параметрический синтез дискретного ПИ регулятора	244
5.5.5. Модальный синтез дискретных систем управления	248
5.5.6. Аналитическое конструирование оптимальных дискретных регуляторов.....	253
6. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	257
6.1. Уравнения нелинейных звеньев и систем.....	257
6.1.1. Статические нелинейные элементы.....	258
6.1.2. Динамические нелинейные элементы	262
6.1.3. Расчетные формы нелинейных моделей	263
6.1.4. Анализ равновесных режимов	267
6.2. Метод фазовой плоскости	268
6.3. Устойчивость нелинейных систем.....	271
6.3.1. Устойчивость невозмущенного движения по Ляпунову.....	271
6.3.2. Первый метод Ляпунова.....	272
6.3.3. Второй метод Ляпунова.....	275
6.4. Абсолютная устойчивость нелинейных систем	281
6.4.1. Понятие абсолютной устойчивости.....	281
6.4.2. Критерий абсолютной устойчивости Попова	281
6.5. Приближенные методы исследования нелинейных систем	284
6.5.1. Метод гармонической линеаризации нелинейного элемента	284
6.5.2. Условия гармонического баланса.....	289
6.5.3. Устойчивость автоколебаний нелинейных систем	291
6.6. Синтез нелинейных систем управления.....	293
6.6.1. Двухпозиционные системы регулирования и их настройка.....	293
6.6.2. Компенсация влияния нелинейности	297
ЛИТЕРАТУРА.....	301