

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

И. В. Мирошник

**ТЕОРИЯ
АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ**

**Нелинейные и оптимальные
системы**



 ПИТЕР



УЧЕБНОЕ / ПОСОБИЕ

И. В. Мирошник

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Нелинейные и оптимальные системы

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по группе направлений подготовки бакалавров и магистров 550000 — «Технические науки» и дипломированных специалистов 650000 — «Техника и технологии» дисциплине «Теория автоматического управления»



300.piter.com

Издательская программа

**300 лучших учебников для высшей школы
в честь 300-летия Санкт-Петербурга**

осуществляется при поддержке Министерства образования РФ

ПИТЕР®

Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж
Ростов-на-Дону · Екатеринбург · Самара · Новосибирск
Киев · Харьков · Минск

2006

ББК 32.965-01я7
УДК 681.5.01(075)
М64

Рецензенты:

Андривевский Б. Р., кандидат технических наук, доцент Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ»

Путов В. В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Мирошник И. В.

М64 Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. — СПб.: Питер, 2006. — 272 с.: ил. — (Серия «Учебное пособие»).

ISBN 5-469-00351-5

В учебном пособии приведены современные методы анализа и проектирования нелинейных систем автоматического управления. Основное внимание уделяется теории гладких систем и ее разделов, ориентированных на решение задач синтеза и недостаточно представленных в существующей литературе. Изучаются особенности нелинейной динамики, понятия и методы современной теории устойчивости. Обсуждаются вопросы преобразования нелинейных систем, точной линеаризации и аппроксимации, а также подходы к решению задач анализа и проектирования нелинейных систем с помощью методов линейной теории. Вводятся понятия управляемости и изучаются методы локальной стабилизации нелинейных объектов, а также вопросы управления каскадными системами. Рассматриваются методы согласованного управления многоканальными системами и решения траекторных задач, проблемы оптимизации и методы синтеза оптимальных систем управления. В книгу включен цикл практических занятий — практикум, основное содержание которого составляют модельные (компьютерные) эксперименты, ориентированные на наглядное подтверждение изучаемых концепций и приобретение навыков синтеза нелинейных и оптимальных систем.

Пособие предназначено как для начального ознакомления с предметом, аппаратом и языком современной теории нелинейных систем, так и для углубленной подготовки. Может быть использовано студентами технических университетов при освоении соответствующих разделов теории автоматического управления, а также аспирантами и научными работниками, специализирующимися в области нелинейной динамики.

ББК 32.965-01я7
УДК 681.5.01(075)

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 5-469-00351-5

© ЗАО Издательский дом «Питер», 2006

Содержание

Предисловие	6
Список сокращений и обозначений	9
Глава 1. Основные понятия и математические модели	11
1.1. Нелинейные функции и отображения	11
1.1.1. Отображения и операторы	11
1.1.2. Функции	14
1.1.3. Векторные поля и распределения	21
1.1.4. Гиперповерхности, поверхности и кривые	23
1.2. Модели нелинейных систем	26
1.2.1. Нелинейные звенья	26
1.2.2. Соединение нелинейных звеньев	30
1.2.3. Основные динамические модели	33
Глава 2. Переходные процессы и особенности нелинейной динамики	36
2.1. Интегральные кривые и фазовые траектории	36
2.1.1. Основные понятия	36
2.1.2. Построение фазовых траекторий: метод припасовывания и метод изоклин	40
2.1.3. Инвариантные множества и аттракторы	46
2.2. Особенности нелинейной динамики	49
2.2.1. Существование решений	50
2.2.2. Единственность решений	52
2.2.3. Продолжимость решений и полнота системы	53
2.2.4. Стационарные решения	55
2.2.5. Инвариантные множества, локальные и глобальные свойства ..	57
Глава 3. Устойчивость нелинейных систем	61
3.1. Основные понятия теории устойчивости	61
3.1.1. Равновесные состояния и устойчивость	61
3.1.2. Первый метод Ляпунова	68
3.1.3. Второй метод Ляпунова	69
3.1.4. Устойчивость линейных и линеаризованных систем	76

3.2. Частичная устойчивость и устойчивость по выходу	78
3.2.1. Устойчивость по части переменных	79
3.2.2. Частичная устойчивость (устойчивость по функции)	83
3.2.3. Устойчивость по выходу	88
3.3. Пассивность и устойчивость по входу	91
3.3.1. Пассивные системы	91
3.3.2. Устойчивость по входу	96
Глава 4. Методы управления гладкими системами	99
4.1. Эквивалентные формы, линеаризация и стабилизация состояния	99
4.1.1. Преобразование автономных систем	100
4.1.2. Преобразования объекта управления и канонические формы ...	105
4.1.3. Управляемость нелинейных систем	110
4.1.4. Методы линеаризации и алгоритмы локальной стабилизации ...	112
4.2. Канонические формы вход-выход и стабилизация выхода	117
4.2.1. Относительная степень и основное преобразование	118
4.2.2. Нуль-динамика и нормальная форма	122
4.2.3. Точная линеаризация и стабилизация выхода	125
4.3. Управление каскадными системами	128
Глава 5. Согласованное управление и траекторные задачи	131
5.1. Задачи согласования и траекторного управления	131
5.2. Управление кинематической моделью	134
5.3. Управление динамической моделью	136
5.4. Управление движением по поверхности	142
Глава 6. Релейные системы	147
6.1. Релейные системы с нелинейным объектом управления	147
6.2. Скользящий режим	151
6.3. Релейные системы с линейным объектом управления	156
6.3.1. Условия устойчивости	157
6.3.2. Скользящий режим и эквивалентное управление	160
6.3.3. Скользящий режим возмущенной системы	163
Глава 7. Оптимальное управление и классические методы оптимизации ..	165
7.1. Задачи оптимального управления	166
7.2. Экстремумы функций	169
7.2.1. Основная задача	169
7.2.2. Задачи на условный экстремум	173
7.3. Простейшая задача вариационного исчисления	176
7.3.1. Вариации функционалов и основные теоремы	178
7.3.2. Параметризация задачи и уравнение Эйлера–Лагранжа	180
7.3.3. Частные случаи и обобщения	183
7.3.4. Задача с подвижными концами	186
7.4. Задачи на условный экстремум	189
7.4.1. Задача Лагранжа	189
7.4.2. Синтез оптимального управления	195

7.5. Теория Гамильтона	198
7.5.1. Каноническая модель в гамильтоновой форме	198
7.5.2. Синтез оптимального управления	200
Глава 8. Методы оптимального управления	202
8.1. Квадратичные функционалы и линейные регуляторы	202
8.1.1. Квадратичные функционалы, задачи оптимизации, линейные обратные связи	203
8.1.2. Решение общей задачи ЛКР	208
8.1.3. Задача оптимизации на бесконечном интервале	216
8.1.4. Асимптотические свойства задачи ЛКР	221
8.2. Принцип максимума	225
8.2.1. Функция Гамильтона и основная теорема	225
8.2.2. Оптимальные управляющие воздействия (частные случаи)	229
8.2.3. Оптимальное быстродействие линейных объектов	235
8.3. Принцип оптимальности и уравнение Беллмана	239
Глава 9. Практикум	245
9.1. Анализ нелинейных систем	245
9.2. Синтез нелинейных систем	251
9.3. Согласованное управление и траекторные задачи	254
9.4. Релейные системы	258
9.5. Оптимальное управление	259
Литература	265
Предметный указатель	268