

УДК 62-50
ББК

А

ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ с примерами на языке MATLAB^R.

/ Б.Р. Андриевский, А.Л.Фрадков – СПб.: Наука, 2000.
– 475 с., ил. 86

ISBN 5-02-024873-8

В книге рассмотрены основные положения метода пространства состояний в теории линейных динамических систем а также применение этого метода к задачам нелинейного и адаптивного управления, в том числе исследования колебательных и хаотических процессов. Приведены способы преобразования динамических моделей, содержатся сведения о вычислительных методах анализа систем. Изложены основные результаты теории оценивания и модального управления. С позиций метода пространства состояний рассмотрены свойства нелинейных систем и методы их исследования. Приводятся сведения о системах с переменной структурой и адаптивных системах управления, а также о задачах управления колебательными и хаотическими процессами. Изложение сопровождается примерами и упражнениями на языке MATLAB, который широко применяется для научно-инженерных расчётов в ведущих зарубежных и отечественных университетах. Книга даёт представление как о сегодняшнем состоянии базовых разделов теории управления, так и о некоторых новых и новейших её достижениях.

Предназначена для студентов, аспирантов и слушателей факультетов повышения квалификации, изучающих курсы "Теория автоматического управления", "Теория систем", "Проектирование систем управления", "Моделирование систем", а также для преподавателей, инженеров и научных работников, интересующихся вопросами анализа и синтеза динамических систем.

Рецензенты: С.Д. Земляков, В.В. Малышев

ISBN 5-02-024873-8

- © Центр "Интеграция", 2000 г.
- © Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков, 2000 г.
- © Л.А. Яценко – оформление, 2000 г.

О Г Л А В Л Е Н И Е

0.1. ПРЕДИСЛОВИЕ	11
ГЛАВА 1. ПРОСТРАНСТВО СОСТОЯНИЙ. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ	15
1.1. Динамические и статические системы. Понятие состояния динамических систем	15
1.2. Уравнения состояния линейных систем	19
1.3. Линеаризация уравнений состояния	21
1.4. Примеры уравнений состояния систем	24
1.4.1. Электротехнические устройства	24
1.4.2. Летательные аппараты	27
1.4.3. Механические конструкции	30
1.4.4. Цифровые устройства	33
1.5. Передаточные функции и их определение по уравнениям состояния	34
1.5.1. Передаточные функции линейных систем	34
1.5.2. Алгоритмы вычисления передаточных функций	36
1.5.3. Примеры перехода к передаточным функциям от уравнений состояния	38
1.6. Частотные характеристики	46
1.6.1. Частотные характеристики непрерывных систем	46
1.6.2. Частотные характеристики дискретных систем	48
1.6.3. Частотные характеристики цифровых систем реального времени	50
1.6.4. Примеры расчета частотных характеристик	51
1.7. Уравнения состояния при соединении систем	58
1.7.1. Независимые подсистемы	58
1.7.2. Последовательное соединение	59
1.7.3. Соединение с обратной связью	59
1.8. Преобразование базиса	60
1.9. Задачи и упражнения	64

ГЛАВА 2. КАНОНИЧЕСКИЕ ФОРМЫ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ	67
2.1. Диагональная и жорданова формы	67
2.1.1. Простые вещественные собственные числа	67
2.1.2. Простые мнимые собственные числа	69
2.1.3. Общий случай. Вещественная форма Жордана	71
2.2. Управляемое каноническое представление	74
2.3. Наблюдаемое каноническое представление	76
2.4. Задачи и упражнения	77
ГЛАВА 3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ К КАНОНИЧЕСКОМУ ВИДУ	80
3.1. Преобразование уравнений состояния к диагональной и блочно-диагональной формам	81
3.1.1. Простые вещественные собственные числа	81
3.1.2. Простые мнимые собственные числа	82
3.2. Преобразование уравнений состояния к управляемой и наблюдаемой каноническим формам	84
3.2.1. О возможности преобразования матрицы к форме Фробениуса	84
3.2.2. Управляемое каноническое представление	86
3.2.3. Наблюдаемое каноническое представление	87
3.2.4. Примеры	89
3.3. Задачи и упражнения	96
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ПО ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ	98
4.1. Управляемое каноническое представление	99
4.2. Наблюдаемое каноническое представление	100
4.3. Блочно-диагональная форма	102
4.4. Жорданова форма	103
4.5. Случай систем с несколькими входами и выходами	105
4.6. Задачи и упражнения	108

ГЛАВА 5. ФАЗОВЫЕ ТРАЕКТОРИИ И ФАЗОВЫЕ ПОРТРЕТЫ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	109
5.1. Определения и основные свойства фазовых траекторий и фазовых портретов	109
5.2. Поле фазовых скоростей. Классификация особых точек	111
5.2.1. Вектор фазовой скорости	111
5.2.2. Состояния равновесия системы	112
5.2.3. Декомпозиция пространства состояний	113
5.3. Виды фазовых портретов для систем второго порядка	117
5.3.1. Фазовые портреты при диагональной (жордановой) форме матрицы A	121
5.3.2. Фазовые портреты при канонической форме фазовой переменной	123
5.4. Задачи и упражнения	126
ГЛАВА 6. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ. ФОРМУЛА КОШИ	128
6.1. Решение уравнений состояния. Формула Коши	128
6.1.1. Решение однородного уравнения	128
6.1.2. Решение неоднородного уравнения	130
6.1.3. Свойства переходной матрицы	131
6.2. Вычисление функции веса	132
6.3. Определение начального состояния по начальному значению выхода и его производных	133
6.4. Дискретные модели непрерывных систем	134
6.4.1. Постановка задачи дискретизации	135
6.4.2. Формулы перехода к разностным уравнениям	137
6.5. Методы вычисления матричной экспоненты	139
6.5.1. Точные методы	139
6.5.2. Приближенные методы	142
6.6. Вычисление матрицы Q в общем случае	145
6.7. Дискретные модели для различных видов входного процесса	146
6.7.1. Смещенное z -преобразование	146
6.7.2. Прямоугольные импульсы	148
6.7.3. Экспоненциальные импульсы	149

6.7.4.	Треугольные импульсы	149
6.8.	Подстановочные формулы для вычисления передаточной функции дискретной модели	150
6.9.	Приведение уравнений многочастотных непрерывно-дискретных систем к одночастотным моделям	153
6.9.1.	Метод аналитических преобразований	154
6.9.2.	Метод моделирования	156
6.10.	Устойчивость дискретных моделей. Связь с методами численного интегрирования	159
6.10.1.	Условия устойчивости	159
6.10.2.	Устойчивость методов численного интегрирования	161
6.11.	Обратная задача – континуализация дискретных моделей	164
6.12.	Задачи и упражнения	165
ГЛАВА 7. УПРАВЛЯЕМОСТЬ И НАБЛЮДАЕМОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ		166
7.1.	Основные определения	166
7.2.	Критерии управляемости	169
7.3.	Критерии наблюдаемости. Теорема дуальности	174
7.4.	Задачи и упражнения	178
ГЛАВА 8. ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА И ВОЗМУЩЕНИЙ		181
8.1.	Постановка задачи оценивания состояния	181
8.2.	Наблюдатели состояния	183
8.3.	Наблюдатели пониженного порядка	187
8.4.	Оценивание возмущений	192
8.5.	Задачи и упражнения	200
ГЛАВА 9. СИНТЕЗ МОДАЛЬНЫХ И ТЕРМИНАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ		202
9.1.	Задача модального управления	202
9.2.	Модальное управление по состоянию объекта	202
9.3.	Модальное управление по выходу объекта. Теорема разделения	204
9.4.	Терминальное управление	208

9.5. Примеры систем модального и терминального управления	211
9.5.1. Стабилизация углового движения ИСЗ с компенсацией возмущений	211
9.5.2. Возбуждение колебаний в цепочке осцилляторов	214
9.6. Задачи и упражнения	218

ГЛАВА 10. УРАВНЕНИЯ И ХАРАКТЕРНЫЕ СВОЙСТВА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	220
10.1. Общие сведения о нелинейных системах	220
10.2. Уравнения нелинейных звеньев и систем	224
10.3. Особенности процессов в нелинейных системах	230
10.3.1. Принцип суперпозиции	231
10.3.2. Сепаратрисные поверхности	232
10.3.3. Предельные циклы. Автоколебания	233
10.3.4. Состояния равновесия. Отрезки покоя	236
10.3.5. Неединственность решений. Пересечение траекторий	237
10.3.6. Скользящие режимы	239
10.3.7. Влияние внешних воздействий	240

ГЛАВА 11. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	242
11.1. Задачи и методы теории нелинейных систем	242
11.2. Методы фазового пространства	244
11.2.1. Метод фазовой плоскости	245
11.2.2. Метод точечных отображений	245
11.2.3. Условия существования предельных циклов для систем второго порядка	246
11.3. Метод гармонической линеаризации (гармонического баланса)	247
11.3.1. Основные положения. "Свойство фильтра"	248
11.3.2. Коэффициенты гармонической линеаризации	250
11.3.3. Уравнение гармонического баланса	252
11.3.4. Пример. Исследование генератора колебаний	256

11.4. Метод функций Ляпунова	261
11.4.1. Основные определения	261
11.4.2. Устойчивость множеств и частичная устой- чивость	264
11.4.3. Функции Ляпунова	268
11.4.4. Устойчивость непрерывных систем	270
11.4.5. Устойчивость дискретных систем	276
11.4.6. Примеры	279
11.5. Методы теории абсолютной устойчивости	286
11.5.1. Задача абсолютной устойчивости	286
11.5.2. Круговой критерий	289
11.5.3. Критерий В.М. Попова	290
11.6. Исследование скользящих режимов. Метод эквивалентного управления	290
11.6.1. Понятие о скользящих режимах	290
11.6.2. Определение движения в скользящем ре- жиме	293

ГЛАВА 12. НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙ- НЫМИ ОБЪЕКТАМИ 298

12.1. Системы с переменной структурой в задаче управления	298
12.2. Системы с переменной структурой в задаче оценивания состояния	305
12.3. Методы адаптивного управления	307
12.3.1. Задача адаптивного управления	307
12.3.2. Структура адаптивных систем управления	308
12.3.3. Методика решения задач адаптивного упра- вления	310
12.4. Адаптивные системы с явной эталонной мо- делью	314
12.4.1. Алгоритмы параметрической адаптации	314
12.4.2. Алгоритмы сигнальной адаптации	318
12.4.3. Алгоритмы сигнально-параметрической адаптации	319
12.5. Адаптивные системы с неявной эталонной моделью	320
12.5.1. Алгоритмы параметрической адаптации	321
12.5.2. Алгоритмы сигнально-параметрической адаптации	322

12.5.3. Пример. Адаптивное управление летательным аппаратом	323
12.6. Алгоритмы адаптивной идентификации . . .	330
12.6.1. Задача параметрической идентификации	330
12.6.2. Идентификации с явной настраиваемой моделью	332
12.6.3. Идентификация на скользящих режимах .	333
12.6.4. Идентификация с неявной настраиваемой моделью	334
12.6.5. Адаптивные наблюдатели	336
12.7. Адаптивное управление с идентификацией на скользящих режимах. Метод шунтирования	339
12.7.1. Постановка задачи	340
12.7.2. Алгоритм настройки параметров	343
12.7.3. Выбор закона управления	345
12.7.4. Пример. Адаптивное управление летательным аппаратом	346
12.8. Задачи и упражнения	352

ГЛАВА 13. УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ И ХАОТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ **354**

13.1. Задачи управления нелинейными колебаниями	354
13.2. Управление энергией колебаний	360
13.2.1. Управление энергией консервативных систем. Частичная стабилизация	360
13.2.2. Возбуждение колебаний нелинейного осциллятора: авторезонанс	363
13.3. Понятие о хаотических системах	367
13.3.1. Развитие понятия колебания	367
13.3.2. Определение хаотической системы	370
13.3.3. Критерии хаотичности	373
13.3.4. Применения хаотических моделей	376
13.4. Адаптивное управление хаотическими системами на основе линеаризации отображения Пуанкаре и метода целевых неравенств	378
13.4.1. Постановка задачи и метод решения . . .	378

13.4.2. Адаптивное управление моделью брус- селятора	382
13.4.3. Адаптивное управление моделью Рёсслера	386
13.5. Управление синхронизацией систем на осно- ве адаптивных наблюдателей	392
13.5.1. Идея управляемой синхронизации	393
13.5.2. Постановка задачи и схема решения	395
13.5.3. Условия адаптивной синхронизации	397
13.5.4. Передача сообщений с использованием систем Чуа	399
ГЛАВА А. Приложение А. МЕТОД СКОРОСТНО- ГО ГРАДИЕНТА	407
ГЛАВА В. Приложение В. МЕТОД КОНЕЧНО-СХОДЯ- ЩИХСЯ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ РЕКУРРЕНТ- НЫХ ЦЕЛЕВЫХ НЕРАВЕНСТВ	413
ГЛАВА С. Приложение С. ФУНКЦИИ И ПОДПРО- ГРАММЫ ПАКЕТА МАТЛАВ	420
ГЛАВА D. Приложение D. ВОЗМОЖНОСТИ СИ- СТЕМЫ SCILAB	437
ГЛАВА Е. ЛИТЕРАТУРА	445