

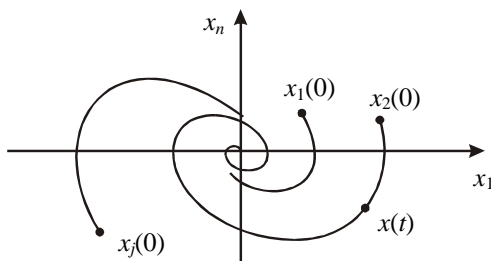
Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А. С. ВОСТРИКОВ, Г. А. ФРАНЦУЗОВА,
Е. Б. ГАВРИЛОВ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НЕПРЕРЫВНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

5-е издание, переработанное и дополненное

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия



НОВОСИБИРСК
2008

УДК 681.511.2(075.8)
В 785

***Инновационная образовательная программа НГТУ
«Высокие технологии»***

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент *В.Н. Аносов*;
д-р техн. наук, зав. лаб. Института автоматики и электрометрии
СО РАН *Ю.Н. Золотухин*

Работа подготовлена на кафедре автоматики
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлениям 550200, 651900 – «Автоматизация и управление»

Востриков А.С.

В 785 Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования. –
5-е изд., перераб. и доп.: учеб. пособие / А.С. Востриков, Г.А. Фран-
цузова, Е.Б. Гаврилов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.

ISBN 978-5-7782-1129-9

**Востриков Анатолий Сергеевич
Французова Галина Александровна
Гаврилов Евгений Борисович**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ НЕПРЕРЫВНЫХ
И ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Н.М. Шуваева*

Подписано в печать 25.11.2008. Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная
Тираж 250 экз. Уч.-изд. л. 24,18. Печ. л. 26,0. Изд. № 219. Заказ № 1534

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

УДК 681.511.2(075.8)

ISBN 978-5-7782-1129-9

© Востриков А.С., Французова Г.А.,
Гаврилов Е.Б., 2008
© Новосибирский государственный
технический университет, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Г л а в а 1. ВВЕДЕНИЕ	13
1.1. Предмет теории автоматического управления	13
1.2. Основные понятия и определения	15
1.3. Примеры систем управления	17
Г л а в а 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	21
2.1. Дифференциальные уравнения	21
2.2. Составление математической модели	24
2.3. Переходная характеристика	29
2.4. Импульсная переходная функция	31
2.5. Переходная матрица	32
2.6. Передаточная функция	34
2.7. Модальные характеристики	40
2.8. Частотные характеристики	42
Заключение	46
Задачи	46
Г л а в а 3. СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД	51
3.1. Типовые динамические звенья	52
3.1.1. Пропорциональное (усилительное) звено	52
3.1.2. Дифференцирующее звено	53
3.1.3. Интегрирующее звено	56
3.1.4. Апериодическое звено	58
3.1.5. Форсирующее звено	62
3.1.6. Звено второго порядка	65
3.2. Структурные схемы	69
3.3. Структурные преобразования	70
3.3.1. Последовательное соединение звеньев	70
3.3.2. Параллельное соединение звеньев	71
3.3.3. Обратная связь	72
3.3.4. Правило переноса	72
3.4. Структурные схемы, соответствующие дифференциальным уравнениям	76
3.5. Переход от передаточной функции к каноническому описанию	78
3.5.1. Первая каноническая форма	79
3.5.2. Вторая каноническая форма	82
3.6. Область применения структурного метода	87
Заключение	87
Задачи	88
Г л а в а 4. УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	91
4.1. Основные понятия	91
4.2. Условия устойчивости линейных систем	94

4.2.1. Общее условие устойчивости линейных систем	94
4.2.2. Необходимое условие устойчивости	96
4.3. Критерии устойчивости	98
4.3.1. Критерий устойчивости Гурвица	98
4.3.2. Критерий устойчивости Михайлова	102
4.3.3. Критерий устойчивости Найквиста	108
4.3.4. Логарифмическая форма критерия Найквиста	113
4.4. Области и запасы устойчивости	116
4.4.1. Основные понятия и определения	116
4.4.2. Частотные оценки запаса устойчивости	118
4.4.3. Корневые оценки запаса устойчивости	119
Заключение	121
Задачи	121
Г л а в а 5. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	127
5.1. Показатели качества переходных процессов	128
5.1.1. Ошибка регулирования	128
5.1.2. Быстродействие	129
5.1.3. Перерегулирование	130
5.1.4. Интегральные оценки	131
5.2. Анализ статических режимов	132
5.2.1. Статические системы	133
5.2.2. Астатические системы	135
5.2.3. Следящие системы (системы позиционирования)	137
5.2.4. Неединичная обратная связь	139
5.3. Частотный метод анализа	142
5.3.1. Общие соотношения	142
5.3.2. Оценка переходных процессов по вещественной частотной характеристике	143
5.3.3. О начальном участке переходной характеристики	146
5.4. Корневой метод анализа	147
5.4.1. Корневые оценки переходного процесса	147
5.5. Анализ процессов в системах низкого порядка	149
5.5.1. Система первого порядка	149
5.5.2. Система второго порядка	150
5.5.3. Система третьего порядка	151
Заключение	154
Задачи	154
Г л а в а 6. СИНТЕЗ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	161
6.1. Основные понятия	161
6.2. Постановка задачи синтеза одноканальных систем	163
6.3. Условия разрешимости задачи синтеза	165
6.3.1. Ресурсное ограничение	165
6.3.2. Устойчивость «обратного» объекта	166
6.3.3. Управляемость	168

6.3.4. Наблюдаемость	170
6.3.5. О вырождении передаточной функции	173
6.4. Частотный метод синтеза	175
6.4.1. Постановка задачи	175
6.4.2. Влияние частотной характеристики разомкнутой системы на свойства замкнутой	176
6.4.3. Основные соотношения частотного метода синтеза	178
6.4.4. Построение асимптотической ЛАЧХ объекта	179
6.4.5. Построение желаемой ЛАЧХ	181
6.4.6. Определение передаточной функции регулятора	184
6.4.7. Влияние возмущения и помехи измерения на свойства замкнутой системы	185
6.4.8. Процедура синтеза регулятора частотным методом	188
6.4.9. О влиянии сокращаемых множителей	189
6.5. Модальный метод синтеза	193
6.5.1. Основные понятия	193
6.5.2. Постановка задачи синтеза для одноканального объекта	194
6.5.3. Выбор корректора статики	195
6.5.4. Расчет корректора динамики	196
6.5.5. Реализация регулятора	199
6.5.6. Процедура синтеза регулятора модальным методом	202
Заключение	206
Задачи	207

Г л а в а 7. ЛИНЕЙНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ	211
7.1. Введение	211
7.2. Динамические характеристики линейных импульсных систем	213
7.2.1. Разностные уравнения	213
7.2.2. Решетчатые функции	217
7.2.3. Экстраполятор нулевого порядка	218
7.2.4. Z-преобразование	221
7.2.5. Дискретные передаточные функции	224
7.2.6. Обратное Z-преобразование	228
7.2.7. Структурные представления дискретных систем	229
7.2.8. Структурные представления разностных уравнений	230
7.2.9. Переход от передаточных функций к структурным схемам	232
7.3. Устойчивость линейных импульсных систем	236
7.3.1. Общее условие устойчивости	238
7.3.2. Геометрическая интерпретация общего условия устойчивости	240
7.3.3. Билинейное преобразование	240
7.3.4. Утверждение Котельникова—Шеннона	242
7.3.5. Преобразование Тастина	245
7.4. Анализ процессов в линейных импульсных системах	248
7.4.1. Задачи анализа	248
7.4.2. Процессы минимальной длительности	250

7.5. Синтез линейных импульсных систем.....	251
7.5.1. Задача синтеза	251
7.5.2. Управляемость линейных импульсных объектов	253
7.5.3. Наблюдаемость линейных импульсных систем	256
7.5.4. Модальный метод синтеза. Процедура синтеза по выходу	259
7.5.5. Процедура модального метода синтеза по состоянию	267
7.5.6. Процедура модального метода синтеза по состоянию для одноканального объекта	270
7.5.7. Построение одноканальных астатических систем	271
7.6. Наблюдатели состояния	274
7.6.1. Операторная процедура синтеза наблюдателей	274
7.6.2. Матричная процедура синтеза наблюдателей	279
7.6.3. Матричная процедура синтеза наблюдателей для одно- канальных объектов	281
7.6.4. Наблюдатели пониженного порядка	283
7.6.5. Особенности уравнений динамики систем с наблюдателями	289
7.7. Реализация типовых ПИД-регуляторов.....	290
7.7.1. Непрерывный аналог	290
7.7.2. Цифровая реализация ПИД-регулятора	291
7.7.3. Модификации цифрового ПИД-регулятора.....	292
7.7.4. О настройке ПИД-регулятора	294
Заключение	295
Задачи	295

Г л а в а 8. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ.....

8.1. Нелинейные дифференциальные уравнения	301
8.2. Пространство состояний	303
8.3. Комбинированное описание нелинейных систем	304
8.4. Особенности процессов в нелинейных системах.....	305
Заключение	306

Г л а в а 9. УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

9.1. Основные понятия и определения.....	308
9.2. Исследование устойчивости по линейному приближению	310
9.3. Второй метод Ляпунова	312
9.3.1. Основные понятия.....	312
9.3.2. Теоремы второго метода Ляпунова	315
9.3.3. Применение второго метода Ляпунова для анализа устой- чивости линейных систем	317
9.3.4. Проверка устойчивости одного класса нелинейных систем	320
9.4. Частотный способ анализа устойчивости.....	323
9.4.1. Теорема Попова об абсолютной устойчивости	323
9.4.2. Графическая интерпретация условий теоремы.....	324
9.4.3. Процедура проверки абсолютной устойчивости	326
Заключение	328
Задачи	329

Г л а в а 10. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ

10.1. Метод фазовой плоскости.....	335
10.2. Метод гармонического баланса	338
10.2.1. Основные сведения.....	338
10.2.2. Метод гармонической линеаризации	339
10.2.3. Основное уравнение метода гармонического баланса	343
10.2.4. Аналитический способ определения автоколебаний.....	344
10.2.5. Влияние параметров системы на периодические процессы	345
10.2.6. Способ Гольдфарба.....	346
10.2.7. Способ Коченбургера	349
10.2.8. Коррекция автоколебаний	351
10.2.9. Условия применимости метода гармонического баланса	351
10.3. Метод малого параметра.....	352
10.4. Метод разделения движений.....	354
10.4.1. Общие свойства систем	354
10.4.2. Выделение отдельных составляющих движения.....	356
10.4.3. Основные теоремы метода разделения движений.....	359
10.4.4. Условие разделимости движений	360
Заключение	364
Задачи	365

Г л а в а 11. СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

11.1. Постановка задачи синтеза нелинейных одноканальных систем.....	372
11.2. Условия разрешимости задачи синтеза	374
11.2.1. Реализуемое состояние равновесия	374
11.2.2. Реализуемые желаемые уравнения	376
11.3. Метод локализации	379
11.3.1. Основные свойства систем первого порядка	380
11.3.2. Оценка влияния помех измерения	382
11.3.3. Дифференцирующий фильтр	383
11.3.4. Анализ влияния малых инерционностей.....	385
11.3.5. Выбор параметров дифференцирующего фильтра	387
11.3.6. Системы произвольного порядка.....	389
11.3.7. Процедура синтеза системы методом локализации	391
Заклучение	393
Задачи	394

Г л а в а 12. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА

12.1. Основные понятия и определения	397
12.2. Описание объекта управления	399
12.3. Типовые модели экстремальной характеристики объекта.....	400
12.4. Условие экстремума	402
12.5. Постановка задачи синтеза экстремальных систем	403
12.6. Способы оценки градиента.....	404

12.6.1. Способ деления производных	404
12.6.2. Способ конечных разностей	405
12.6.3. Оценка знака градиента	406
12.6.4. Способ синхронного детектирования	407
12.6.5. Оценка градиента с помощью специального фильтра	411
12.7. Организация движения к экстремуму	413
12.7.1. Градиентные системы первого порядка	413
12.7.2. Метод «тяжелого шарика»	415
12.7.3. Одноканальные системы общего вида	417
12.7.4. Градиентные системы, основанные на методе локализации	418
Заключение	422
Задачи	423
Г л а в а 13. ОПТИМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	427
13.1. Основные понятия	427
13.2. Постановка задачи синтеза оптимальных систем	430
13.2.1. Описание объекта управления	430
13.2.2. Описание начальных и конечных состояний	430
13.2.3. Ограничения на переменные состояния и управление	432
13.2.4. Критерий оптимальности	433
13.2.5. Форма результата	435
13.3. Метод динамического программирования	435
13.3.1. Принцип оптимальности	435
13.3.2. Основные соотношения метода динамического программирования	436
13.3.3. Расчетные соотношения метода динамического программирования	439
13.4. Принцип максимума Понтрягина	442
13.4.1. Основное соотношение принципа максимума	442
13.4.2. Процедура определения оптимального управления	444
13.4.3. Задача оптимального быстрогодействия	448
13.5. Метод поверхности переключения	452
13.5.1. Основные понятия	452
13.5.2. Метод обратного времени	454
13.6. Субоптимальные системы	458
Заключение	460
Задачи	461
Послесловие	463
Библиографический список	469
Приложения	472