

О. Дж. М. Смит

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Отто Лис. М. Смит.

Автоматическое регулирование

М., Физматгиз, 1962 г., 848 стр. с илл.

Редактор О. К. Соболев

Техн. редактор И. Ф. Бруно.

Корректор Л. О. Сеченова

Сдано в набор 4/VII 1962 г. Подписано
и печати 27/X 1962 г. Бумага 60×90/16.
Числ печ. л. 53. Условн. печ. л. 53.
Уч.-изд. л. 53,35. Тираж 16000 экз.
Цена книги 2 р. 87 к. Заказ № 318.

Государственное издательство

физико-математической литературы.

Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Московская типография № 5

Мосгорсовнапхоза.

Москва, Технический пер., 9.

Заказ № 3521.

Отпечатано с матриц в типографии «Валь-
дас» г. Вильнюс, ул. Страздзини 1.

ОТТО ДЖ. М. СМИТ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО

под редакцией
Е. П. ПОПОВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1962

McGraw-Hill Series in Control Systems
Engineering John R. Ragazzini and William
E. Vannah, *Consulting Editors*

FEEDBACK CONTROL SYSTEMS

OTTO J. M. SMITH

Professor of Electrical Engineering
University of California, Berkeley

McGraw-Hill Book Company, Inc.

New York, Toronto, London

1958

ОГЛАВЛЕНИЕ

От издательства	12
Предисловие	13
Условные обозначения	16

ЧАСТЬ I ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ

Г л а в а 1. Введение (<i>Перевод В. В. Семенова</i>)	23
1.1. Системы с обратной связью	23
1.2. Системы управления в обществе	23
1.3. Преимущества обратной связи	24
1.4. Характеристики систем с обратной связью	24
1.5. Значение линейности	25
1.6. Эталоны для регуляторов	26
1.7. Интегрирующие звенья	26
1.8. Анализ проектируемых и существующих систем	26
1.9. Преобразование Лапласа	27
1.10. Графические построения	28
1.11. Структурные схемы	28
1.12. Оценка переходной характеристики по графику на L -плоскости	30
1.13. Единицы L -плоскости	31
1.14. Проектирование систем	32
1.15. Стабилизация	33
1.16. Регулирование по принципу «разгон — торможение»	33
1.17. Полный контур регулирования	34
1.18. Заключение	36
Задачи	36
Литература	37
Г л а в а 2. Анализ одноконтурных систем (<i>Перевод В. В. Семенова</i>)	39
2.1. Переходная характеристика	39
2.2. Графическое изображение s -плоскости	43
2.3. Показатель затухания	44
2.4. Частотная характеристика	48
2.5. Характеристика разомкнутой системы	51
2.6. Выбор масштабов	51
2.7. Нахождение полюсов замкнутой системы по расположению полюсов разомкнутой системы	53
2.8. Кривая Найквиста	54
2.9. L -плоскость	55

2.10. Смещенная кривая Найквиста	59
2.11. Разложение выражения для ψ в ряд Тейлора	60
2.12. Вектор запаса	61
2.13. Вектор ослабления	62
2.14. Функции ошибки	63
2.15. Окружности M	67
2.16. Седловые точки	69
2.17. Устойчивость	69
2.18. Графики Боде	70
2.19. Заключение	73
Задачи	75
Литература	77
Глава 3. Аналогии s-плоскости (Перевод Е. Н. Фоминой)	79
3.1. Введение	79
3.2. Аналог потенциальной плоскости	81
3.3. Устройство аналога	82
3.4. Градуировка	84
3.5. Частотная характеристика	87
3.6. Амплитудная частотная характеристика	89
3.7. Фазовая частотная характеристика	90
3.8. Геометрический аналог	91
3.9. Импульсная характеристика	94
3.10. Переходная характеристика	97
3.11. Реакция системы на входное воздействие произвольного вида	99
3.12. Корни многочленов	101
3.13. Плоскость $\ln s$ или W -плоскость	103
3.14. z -плоскость	106
3.15. Получение характеристик замкнутой системы по данным разомкнутой системы	108
3.16. Заключение	109
Задачи	110
Литература	112
Глава 4. Многоконтурные системы (Перевод В. Ф. Иванова)	113
4.1. Введение	113
4.2. Определения	118
4.3. Сумматоры	119
4.4. Динамические звенья	120
4.5. Исследование системы при помощи определителей	123
4.6. Преобразования и подстановки в блок-схемах	128
4.7. Преобразование систем из ненаправленных звеньев	134
4.8. Четырехполюсники	138
4.9. Системы с одним главным каналом передачи	145
4.10. Образование новых полюсов и нулей	147
4.11. Минимально-фазовые системы	150
4.12. Условия устойчивости	152
4.13. Критерий Рауса	153
4.14. Отображение правой полуплоскости	153
4.15. Аналитическое продолжение	159
4.16. Порядок исследования системы	160
4.17. Причины введения обратной связи	164
4.18. Регулирование с упреждением в неминимально-фазовой системе	170
4.19. Квадратичная ошибка	171

4.20. Заключение	173
Задачи	174
Литература	178
Глава 5. Спектральная плотность (Перевод А. А. Первозванского)	180
5.1. Случайные сигналы	180
5.2. Спектральные плотности	186
5.3. Взаимные спектральные плотности (спектры взаимной мощности)	189
5.4. Сложение	192
5.5. Корреляция	193
5.6. Периодические функции	201
5.7. Динамические операторы	204
5.8. Цепи	207
5.9. Лабораторные измерения	209
5.10. Оптимальная форма представления корреляционной функции	211
5.11. Испытания на прохождение шума	214
5.12. Оптимальные фильтры шумов	216
5.13. Сравнение преобразований Фурье и Лапласа	217
5.14. Заключение	219
Задачи	220
Литература	222

ЧАСТЬ II ЛИНЕЙНЫЙ СИНТЕЗ

Глава 6. Проектирование оптимальных линейных систем (Перевод А. А. Первозванского)	225
6.1. Введение	225
6.2. Минимум среднего квадрата ошибки	226
6.3. Оптимальная линейная блокируемая полуустойчивая система	228
6.4. Усилитель с бесконечно большим коэффициентом усиления	233
6.5. Функции различных частей системы	237
6.6. Годограф нулей спектральной плотности входного сигнала	241
6.7. Оператор реализуемости	245
6.8. Примеры устойчивых реализуемых систем	249
6.9. Физическая реализуемость	252
6.10. Компенсирующие нули	253
6.11. Как действует оператор реализуемости	255
6.12. Проблема аппроксимации при проектировании	256
6.13. Заключение	257
Задачи	258
Литература	259
Глава 7. Преобразование фильтра в систему с обратной связью (Перевод А. А. Первозванского)	260
7.1. Спектральные плотности типовых сигналов	260
7.2. Константы ошибок по положению, по скорости и по ускорению	265
7.3. Пример	269
7.4. Полоса пропускания	272
7.5. Критерии демпфирования	274
7.6. Почти оптимальные линейные устойчивые следящие системы	276

7.7. Усилитель в системе управления	281
7.8. Возмущения от нагрузки и внутренний шум	288
7.9. Преобразования блок-схем	288
7.10. Заключение	288
Задачи	289
Литература	290
Глава 8. Проектирование систем с неизменяемыми частями и систем с переменными параметрами (Перевод А. А. Первозванского)	291
8.1. Введение	291
8.2. Проектирование регулятора	293
8.3. Постановка задачи	302
8.4. Вычислительные устройства	302
8.5. Неизменяемая выходная нагрузка и преобразователь	304
8.6. Системы с переменными параметрами	313
8.7. Автоматическое регулирование усиления	321
8.8. Системы связи с большим запаздыванием	326
8.9. Предсказывающие устройства	330
8.10. Заключение	333
Задачи	334
Литература	337
Глава 9. Методика проектирования (Перевод Я. Е. Гукайло)	338
9.1. Введение	338
9.2. Выбор звеньев	339
9.3. Коррекция на одной частоте	342
9.4. Траектория корней	345
9.5. Графические методы построения траектории корней	349
9.6. Линии модуля	357
9.7. Расчет фазо-опережающей цепи	357
9.8. Мостовое T -образное звено	360
9.9. Траектория полюсов как функция переменного параметра	361
9.10. Производственные допуски	365
9.11. Уровень мощности на входе системы	366
9.12. Уровень мощности на выходе	368
9.13. Коэффициент усиления по мощности	370
9.14. Размещение звеньев	372
9.15. Модель в цепи обратной связи	373
9.16. Параллельное управление	374
9.17. Вычислительное устройство компенсации	377
9.18. Дополнительные шаблоны на L -плоскости	381
9.19. Заключение	388
Задачи	389
Литература	392
Глава 10. Системы с распределенными параметрами (Перевод Я. Е. Гукайло)	393
10.1. Введение	393
10.2. Линия передачи	394
10.3. Время запаздывания	395
10.4. Запаздывание в замкнутой цепи	397
10.5. Запаздывание при наличии интегрирования	398
10.6. Запаздывание при наличии постоянной времени	402
10.7. Аналог звена с запаздыванием	405

10.8. Цепь с распределенным замедлением	410
10.9. Аналог распределенного замедления	414
10.10. Распределенное замедление в замкнутой цепи	415
10.11. Релейная система управления звеном с распределенным замедлением	417
10.12. Переходные процессы в цепи с распределенными замедлениями	417
10.13. Экспериментальные исследования систем с распределенными параметрами	419
10.14. Наклонные функции; цепи с пространственно распределенными параметрами	422
10.15. Наклонная функция в замкнутой системе управления	424
10.16. Линейное управление с предсказанием в цепи с запаздыванием	427
10.17. Управление с предсказанием в цепи с неминимально-фазовыми нулями	434
10.18. Управление слабо демпфированным звеном при помощи метода чередующихся воздействий	437
10.19. Управление слабо демпфированной системой при помощи метода чередующихся воздействий	444
10.20. Переходный процесс длительностью в четверть периода	445
10.21. Компенсация возмущений нагрузки	449
10.22. Диаграмма метода двух кривых	454
10.23. Заключение	456
Задачи	457
Литература	463

ЧАСТЬ III

НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ

Глава 11. Анализ релейных систем (<i>Перевод В. Ф. Иванова</i>) . . .	467
11.1. Введение	467
11.2. Типы систем	468
11.3. Виды анализа и синтеза	469
11.4. Двухпозиционные реле	471
11.5. Инерционные системы первого порядка	472
11.6. Исследование переходного процесса	474
11.7. Частота колебаний	478
11.8. Средняя ошибка	479
11.9. Передаточная функция реле при воздействии синусоидального сигнала	480
11.10. Передаточная функция, зависящая от частоты	484
11.11. Шаблон для L -плоскости	487
11.12. Передаточная функция реле при входном сигнале треугольной формы	487
11.13. Положение шаблона для различных значений гистерезиса	490
11.14. Шаблон для построения передаточной функции реле при входном сигнале треугольной формы	492
11.15. Ошибки релейной системы	495
11.16. Позиционная следящая система типа «да — нет»	497
11.17. Передаточная функция реле	501
11.18. Гистерезис	503
11.19. Сигналы нагрузки	505
11.20. Константы линейной ошибки	507
11.21. Форма колебаний	508

11.22. Реакция замкнутой релейной системы на синусоидальный входной сигнал	509
11.23. Переходный процесс при ступенчатом входном воздействии	512
11.24. График передаточной функции реле на s -плоскости	513
11.25. Релейный регулятор системы с распределенным запаздыванием	514
11.26. Заключение	516
Задачи	516
Литература	517

Глава 12. Многопозиционные контакторы (Перевод В. Н. Иванова) 519

12.1. Введение	519
12.2. Трехпозиционный контактор без гистерезиса	522
12.3. Амплитудные характеристики	528
12.4. Пример системы позиционного регулирования	530
12.5. Нелинейная компенсация	533
12.6. Ошибки	535
12.7. Амплитудный резонанс основной составляющей ошибки	536
12.8. Области неустойчивости	541
12.9. Гармонический резонанс	547
12.10. Трехпозиционный контактор с гистерезисом	549
12.11. Фазовая плоскость	551
12.12. Заключение	555
Задачи	556
Литература	558

Глава 13. Направленные и разрывные нелинейности (Перевод В. Н. Иванова) 560

13.1. Введение	560
13.2. Переменный коэффициент усиления	562
13.3. Коэффициент усиления, меняющийся в зависимости от нагрузки	563
13.4. Насыщение	567
13.5. Генератор со сдвигом фазы	570
13.6. Одноконтурная система	573
13.7. Области устойчивости	574
13.8. Функция передачи звена с насыщением для синусоидального сигнала	576
13.9. n -позиционный контактор	582
13.10. Функция передачи звена с зоной нечувствительности для синусоидального сигнала	585
13.11. Переходные процессы в звене с зоной нечувствительности	588
13.12. Амплитудно-зависимые функции передачи звеньев с насыщением и зоной нечувствительности для сигналов несинусоидальной формы	590
13.13. Гистерезис	592
13.14. Функция передачи звена с гистерезисом для сигнала треугольной формы	596
13.15. Другие типы нелинейностей: предварительная пружинная нагрузка и отрицательные потери	597
13.16. Проектирование замкнутой системы	600
13.17. Заключение	604
Задачи	605
Литература	608

Глава 14. Ненаправленные нелинейности и нелинейные системы (Перевод В. Н. Иванова)	610
14.1. Введение	610
14.2. Механический стопор	610
14.3. Люфт	614
14.4. Скоростной гистерезис	616
14.5. Ненаправленное нелинейное звено	622
14.6. Кулоново трение	623
14.7. Релейная компенсирующая цепь с обратной связью	626
14.8. Линеаризация	631
14.9. Параметрическая обратная связь	633
14.10. Переменная постоянная времени	635
14.11. Нормирование	639
14.12. Неявные вычислительные устройства	641
14.13. Множительное устройство	644
14.14. Заключение	646
Задачи	647
Литература	649

ЧАСТЬ IV НЕЛИНЕЙНЫЙ СИНТЕЗ

Глава 15. Основы управления с предсказанием в нелинейных системах (Перевод С. П. Моржакова)	653
15.1. Введение	653
15.2. Системы с одним интегралом	656
15.3. Система с одной постоянной времени	658
15.4. Система с двумя интегралами	658
15.5. Определение управляющей функции по первой траектории	659
15.6. Фазовая плоскость	663
15.7. Линии переключения	666
15.8. Приближенные управляющие функции	667
15.9. Система управления	669
15.10. Нелинейная цепь, вносящая опережение по фазе	671
15.11. Аналитический вывод управляющей функции	679
15.12. Предварительная схема с двумя интегралами	683
15.13. Инженерный подход	685
15.14. Работа в линейном режиме	685
15.15. Нелинейные преобразования	687
15.16. Статистические предсказатели	689
15.17. Параметрическая обратная связь	691
15.18. Допущения	692
15.19. Заключение	693
Задачи	695
Литература	697
Глава 16. Управление с предсказанием в элементарных системах с насыщением (Перевод С. П. Моржакова)	698
16.1. Введение	698
16.2. Интеграл и одна постоянная времени	699
16.3. Переменные, зависящие от ошибки	701
16.4. Фазовая плоскость для системы с интегралом и одной постоянной времени	704
16.5. Степенной закон управления для системы с интегралом и одной постоянной времени	707

16.6.	Синтез при помощи замены переменных	710
16.7.	Примерная блок-схема	713
16.8.	Расчет нелинейности	714
16.9.	Режим работы	715
16.10.	Преобразования нелинейных блоков	717
16.11.	Упрощенная логарифмическая функция	722
16.12.	Окончательная цепь	722
16.13.	Регулировка реального оборудования	724
16.14.	Расчет регулятора	727
16.15.	Наличие нуля на s -плоскости	728
16.16.	Выводы по управлению системой, содержащей интеграл и постоянную времени	731
16.17.	Система с двумя постоянными времени	734
16.18.	Система с нулем на s -плоскости	740
16.19.	Частотная характеристика	743
16.20.	Заключение	744
Задачи		746
Литература		747
Глава 17. Управление с предсказанием в сложных нелинейных системах (Перевод С. П. Моржакова)		749
17.1.	Введение	749
17.2.	Многokrатное интегрирование	749
17.3.	Система с тройным интегралом	752
17.4.	Управление в системе с одним интегралом и двумя постоянными времени	755
17.5.	Стабилизация системы с насыщением при помощи диодов	761
17.6.	Трехмерное фазовое пространство	762
17.7.	Некоторые варианты	764
17.8.	Приближенное управление с предсказанием в системах высокого порядка	764
17.9.	Процессы с длительным чистым запаздыванием	767
17.10.	Использование усилителя с насыщением при вычисле- нии функции G	770
17.11.	Неминимально-фазовые звенья	770
17.12.	Применение предсказателя системы с запаздыванием для управления системами высокого порядка	772
17.13.	Насыщение по нескольким переменным	772
17.14.	Ограничение по скорости	776
17.15.	Заключение	776
Задачи		778
Литература		779
Глава 18. Система с несущей частотой (Перевод В. А. Зайцева).		780
18.1.	Введение	780
18.2.	Синусоидальный модулятор	783
18.3.	Примеры модуляции	785
18.4.	Синусоидальная демодуляция	788
18.5.	Косинусоидальная модуляция	792
18.6.	Квадратурная демодуляция	795
18.7.	Переменная угловая модуляция и демодуляция	796
18.8.	Линейность системы	798
18.9.	Цепи несущей частоты	799
18.10.	Пульсация в замкнутой цепи	800
18.11.	Определение передаточной функции замкнутой цепи по характеристикам разомкнутой цепи	803

18.12. Цепи, создающие опережение по фазе модуляционной огибающей	806
18.13. Комплексные нули передаточной функции части системы, работающей на демодулированном сигнале	811
18.14. Компенсация изменений несущей по частоте	812
18.15. Нелинейные цепи, создающие опережение по фазе модуляционной огибающей	816
18.16. Электромеханические устройства для создания опережения	819
18.17. Интегрирующие устройства	820
18.18. Модуляция вращением	822
18.19. Заключение	825
Задачи	827
Литература	827
Приложение А	829
Приложение Б	841
Предметный указатель	842

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

В предлагаемой вниманию читателя книге О. Дж. М. Смита рассматривается большой комплекс вопросов, связанных с методами расчета систем автоматического регулирования и управления. Ряд вопросов изложен в оригинальной трактовке. Книга представляет интерес для инженеров, проектирующих автоматические системы, а также для аспирантов, специализирующихся по автоматике. Удовлетворяя именно этим интересам, книга предполагает наличие у читателя знания основ теории автоматического регулирования. Многие исходные положения, используемые в книге, автор считает известными. Он не приводит их теоретических обоснований, преследуя в основном прикладные цели синтеза автоматических систем.

При переводе исправлены замеченные опечатки в формулах и неточности изложения.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этой книге дается единый подход к анализу и расчету замкнутых систем автоматического регулирования всех типов. Динамика различных систем в экономике, социологии, управлении государством, охране животных, управлении процессами, механике, наведении на цель имеет много общего. Свойства отдельных звеньев таких систем составляют характеристику разомкнутого контура системы. Требования к характеристикам замкнутой системы определяются функциями, которые должна выполнять система, и характером выполнения этих функций.

Анализ есть определение характеристик замкнутой системы по характеристикам отдельных звеньев. В этой книге приводятся определенные соотношения между переходными, частотными или статистическими характеристиками разомкнутой и замкнутой системы. По любой из этих шести характеристик можно рассчитать пять других. Например, переходная характеристика замкнутой системы может быть получена по таким данным разомкнутой системы, как вектор запаса и вектор ослабления.

Синтез есть нахождение требуемых звеньев, исходя из формулировки желаемого характера работы системы в целом. Линейный статистический расчет базируется на минимуме среднего квадрата ошибки. Единственной аппроксимацией является выражение в аналитической форме исходных спектральных данных для сигнала, шумов и возмущений. Все ограничения, налагаемые на систему, вводятся в такой же форме, что и спектральные данные. Окончательная система является оптимальным линейным предсказателем, исправляющим несовершенство неизменяемых звеньев системы.

В структурную схему системы, насколько это возможно, включаются инерционности и время запаздывания с последующим преобразованием структурной схемы для образования линейного аналитического предсказателя. Системы автоматического управления отличаются от системы передачи информации тем, что в первых всякое запаздывание считается серьезным недостатком.

В то же время в системах передачи информации даже большое время запаздывания часто не принимается во внимание. Цепь основной обратной связи системы управления является специальной формой канала передачи информации с минимальным запаздыванием.

Нелинейные ограничения (такие, как ограничение максимальной производительности, ограничение максимальной скорости или ограничение максимального усилия) приводят к нелинейному расчету, основанному на минимизации времени отработки ошибки. Для такого вида оптимальной нелинейной системы необходимо вычислительное устройство, определяющее производные входных и выходных величин. Здесь лучшие результаты дают статистические методы, однако приемлемы и приближенные расчеты по полосе пропускания. Окончательная система имеет линейные предсказатели для того, чтобы отделить полезный сигнал от помех, и нелинейные предсказатели для улучшения динамики выходного звена. Эти предсказатели совместно вырабатывают функцию управления, которая дает максимальное усилие, максимальное торможение или свободный ход.

Данная книга рассчитана на читателя, который по крайней мере прослушал предварительный курс систем автоматического управления и изучал статистику с точки зрения преобразований Фурье и Лапласа, случайных гауссовых сигналов, функции веса и взаимной спектральной плотности.

Книга представляет собой учебник для первого года аспирантуры. Он разделен на следующие четыре части: линейный анализ, линейный синтез, нелинейный анализ установившихся процессов и нелинейный синтез. Можно изменять порядок изучения для элементарного и повышенного курсов. Элементарным курсом можно считать главы 1—6, 9—11 и 15. Повышенный курс — главы 4, 7, 8, 12—14, 16 и 17.

Организациям, занимающимся проектированием систем, полезно сделать из какого-либо прозрачного материала большие шаблоны имеющихся в книге построений на L -плоскости.

Использованные в книге обозначения соответствуют обозначениям, принятым в статистике, теории преобразований, теории автоматического регулирования, теории нелинейных систем, теории цепей и теории следящих систем. В помощь тем, кто пожелает читать книгу не по порядку, помещается общий список условных обозначений.

Ссылки на литературные источники даются по ходу текста. В конце каждой главы имеется относящийся к ней библиографический перечень. Литература расположена в хронологическом порядке: вначале указываются первоисточники, затем несколько наиболее полезных с прикладной точки зрения статей и, наконец,

работы, которые, по мнению автора, указывают на перспективные направления для дальнейшего развития.

Автор высоко ценит поддержку, которую он получал от своих многочисленных коллег во всем мире. Нужно отдать должное всем авторам, упомянутым в настоящей книге, ибо каждый из них внес свой вклад в дело развития теории автоматического управления. Появление этого труда оказалось возможным только благодаря совместным достижениям всех этих людей и свободному обмену знаниями между ними.

Отто Дж. М. Смит