

В. П. Бакалов
В. Ф. Дмитриков
Б. И. Крук

Основы теории цепей

Под редакцией В. П. Бакалова

4-е издание

*Рекомендовано УМО по образованию в области
Инфокоммуникационных технологий и систем связи
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки
210700 – «Инфокоммуникационные технологии
и системы связи»*

Москва
Горячая линия - Телеком
2013

УДК 621.373(075)

ББК 32.88

Б19

Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И.

Б19 Основы теории цепей: Учебное пособие для вузов. Под ред. В. П. Бакалова. – 4-е изд. – М.: Горячая линия– Телеком, 2013. – 596 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0329-6.

Изложена теория электрических цепей, на основе которой дается представление об анализе и синтезе схем усилителей, генераторов, фильтров, корректоров и других устройств. С целью лучшего усвоения материала большинство теоретических положений проиллюстрировано примерами. В конце глав приводятся тесты для самоконтроля.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

ББК 32.88

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

**Бакалов Валерий Пантелеевич
Дмитриков Владимир Федорович
Крук Борис Иванович**

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Учебное пособие для вузов

4-е издание

Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 28.12.2012. Печать цифровая. Формат 60×88/16.

Уч. изд. л. 37,5. Тираж 1000 экз. (1-й завод 200 экз.)

ISBN 978-5-9912-0329-6

© В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков,
Б. И. Крук, 2000, 2013

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ к 4-му изданию

Дисциплина «Основы теории цепей» (ОТЦ) является базовым курсом при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Телекоммуникации», «Радиотехника», а также инженеров по специальностям связи и смежным специальностям.

Первое издание учебника «Основы теории цепей» вышло в 2000 году. Несмотря на то, что курс ОТЦ имеет сложившуюся структуру и уже значительную историю, бурное развитие телекоммуникаций и информатики потребовало внести в его содержание ряд значительных изменений, которые нашли отражение в последующих изданиях. Это касается в первую очередь расширения разделов, посвященных теории активных цепей и цепей с обратной связью. Дополнены и переработаны разделы, посвященные машинным методам анализа и синтеза электрических цепей. Существенно переработаны и дополнены главы, в которых изучаются нелинейные и автоколебательные цепи, в частности, включен материал, посвященный анализу автогенераторов методом медленно меняющихся амплитуд.

С учетом развития цифровых методов обработки сигналов, полностью переработана и расширена глава, посвященная дискретным цепям и цифровым фильтрам.

Введение нового поколения Федеральных государственных образовательных стандартов в Российской системе высшего образования потребовало изменения методики и объема преподавания предмета.

Настоящее 4-е издание книги «Основы теории цепей» рекомендовано в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Может быть использовано как учебное пособие по следующим дисциплинам учебных планов: «Теория электрических цепей», «Теоретические основы электротехники», «Основы теории цепей», «Электротехника и электроника».

С целью лучшего усвоения материала большинство теоретических положений учебного пособия проиллюстрировано примерами. Каждая глава содержит перечень контрольных вопросов и задач с ответами, позволяющих закрепить изученный материал. Для удобства пользования пособие снабжено предметным указателем.

В конце учебного пособия приведен список основной и дополнительной литературы, которая может быть использована при изучении соответствующих дисциплин. Кроме того, по тексту изложения материала имеются дополнительные ссылки на литературу, где более подробно освещены некоторые специальные вопросы.

В подготовке данного издания книги большую помощь оказали авторам сотрудники кафедр ТЭЦ Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ) и Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), которым авторы выражают глубокую благодарность.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к 4-му изданию	3
Введение	5
Глава 1. Основные понятия и законы теории электрических цепей	10
1.1. Ток, напряжение, мощность	10
1.2. Электрическая цепь, ее элементы и модели	12
1.3. Электрическая схема, топология электрической цепи	24
1.4. Законы Кирхгофа	28
1.5. Принцип эквивалентности. Преобразования электрических схем	30
1.6. Принцип наложения	33
1.7. Теорема замещения	34
1.8. Теорема об активном двухполюснике	35
1.9. Принцип дуальности	37
1.10. Теорема Телледжена. Баланс мощности	38
Вопросы и задания для самопроверки	40
Глава 2. Линейные электрические цепи в режиме постоянного тока	41
2.1. Метод законов Кирхгофа	41
2.2. Преобразование резистивных электрических цепей	43
2.3. Метод наложения	47
2.4. Метод контурных токов	49
2.5. Метод узловых потенциалов	53
2.6. Метод эквивалентного генератора	57
2.7. Примеры применения резистивных цепей	60
2.8. Алгоритмы анализа линейных резистивных цепей на ЭВМ	65
Вопросы и задания для самопроверки	71
Глава 3. Линейные электрические цепи в режиме гармонических колебаний	72
3.1. Гармонические колебания. Основные понятия и определения	72
3.2. Способы представления гармонических колебаний	75
3.3. Гармонические колебания в резистивных, индуктивных и емкостных элементах	78
3.4. Гармонические колебания в цепи при последовательном соединении R , L , C -элементов	80
3.5. Гармонические колебания в цепи при параллельном соединении R , L , C -элементов	81
3.6. Символический метод расчета разветвленных цепей	83
3.7. Электрические цепи с индуктивными связями	89
3.8. Особенности анализа индуктивно связанных цепей	96
3.9. Трансформатор	98
3.10. Баланс мощности	102
3.11. Модели электрических цепей с зависимыми источниками	104
Вопросы и задания для самопроверки	108
Глава 4. Частотные характеристики электрической цепи	110
4.1. Комплексные передаточные функции линейных электрических цепей	110
4.2. Частотные характеристики последовательного колебательного контура	113
4.3. Частотные характеристики параллельного колебательного контура ...	121

4.4. Частотные характеристики связанных колебательных контуров	128
4.5. Частотные характеристики реактивных двухполюсников	134
4.6. Машинные методы анализа частотных характеристик электрических цепей	137
Вопросы и задания для самопроверки	143
Глава 5. Линейные электрические цепи в режиме периодических негармонических воздействий	144
5.1. Негармонические периодические сигналы. Разложение в ряд Фурье .	144
5.2. Действующее, среднее значение и мощность периодического негармонического сигнала	148
5.3. Спектры периодических негармонических сигналов	150
5.4. Расчет цепей при периодических негармонических воздействиях	152
Вопросы и задания для самопроверки	156
Глава 6. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Классический метод анализа	157
6.1. Переходный режим электрических цепей. Законы коммутации	157
6.2. Классический метод расчета переходных процессов	159
6.3. Переходные процессы в цепях первого порядка	161
6.4. Переходные процессы в цепях второго порядка	167
6.5. Включение RLC -контра на постоянное и гармоническое напряжение	172
6.6. Переходные процессы в разветвленных цепях	175
6.7. Метод переменных состояния	178
Вопросы и задания для самопроверки	183
Глава 7. Операторный метод анализа переходных процессов в линейных цепях	185
7.1. Преобразование Лапласа и его свойства	185
7.2. Теорема разложения	191
7.3. Расчет переходных процессов операторным методом	193
7.4. Операторные передаточные функции	196
Вопросы и задания для самопроверки	199
Глава 8. Временной метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях	200
8.1. Переходные и импульсные характеристики электрических цепей	200
8.2. Интеграл Дюамеля	204
8.3. Интеграл наложения	206
Вопросы и задания для самопроверки	208
Глава 9. Частотный метод анализа переходных процессов в линейных цепях	209
9.1. Интеграл Фурье	209
9.2. Основные теоремы спектрального анализа	215
9.3. Распределение энергии в спектре непериодического сигнала	216
9.4. Спектры типовых сигналов	217
9.5. Частотный анализ линейных электрических цепей при непериодических воздействиях	222
9.6. Условия безыскаженной передачи сигналов через линейную цепь	225
9.7. Связь между временными и частотными характеристиками электрических цепей	229
	593

Вопросы и задания для самопроверки	232
Глава 10. Нелинейные электрические цепи в режиме постоянного тока	233
10.1. Нелинейные элементы. Их характеристики и свойства	233
10.2. Графические методы расчета цепей с нелинейными резистивными двухполюсниками	237
10.3. Графические методы расчета цепей с нелинейными резистивными четырёхполюсниками	241
10.4. Эквивалентные преобразования схем с нелинейными элементами	242
10.5. Аналитическое представление вольт-амперных характеристик	245
10.6. Аналитические методы расчета нелинейных резистивных цепей	254
10.7. Стабилизация постоянного напряжения нелинейными резистивными цепями	258
Вопросы и задания для самопроверки	259
Глава 11. Нелинейные электрические цепи при гармонических воздействиях	262
11.1. Нахождение реакции нелинейной резистивной цепи на заданное воздействие	262
11.2. Режим малых колебаний в нелинейных электрических цепях	265
11.3. Воздействие гармонического колебания на нелинейный резистивный элемент	267
11.4. Резонансное усиление и умножение частоты колебаний	275
11.5. Выпрямление гармонических колебаний	279
11.6. Ограничение мгновенных значений гармонических колебаний	283
11.7. Воздействие суммы гармонических колебаний на нелинейный резистивный элемент	285
11.8. Преобразование частоты гармонического колебания	287
Вопросы и задания для самопроверки	290
Глава 12. Основы теории четырехполюсников	291
12.1. Общие положения	291
12.2. Уравнения передачи четырехполюсника	294
12.3. Применение матриц к расчету четырехполюсников	301
12.4. Параметры холостого хода и короткого замыкания четырёхполюсника	310
12.5. Характеристические параметры четырехполюсника	312
12.6. Внешние характеристики четырехполюсника	320
Вопросы и задания для самопроверки	324
Глава 13. Цепи с распределенными параметрами	326
13.1. Общие положения	326
13.2. Уравнения передачи однородной линии	328
13.3. Падающие и отраженные волны	333
13.4. Вторичные параметры однородной линии	337
13.5. Входное сопротивление линии	341
13.6. Линия без потерь	343
13.7. Применение отрезков линий с пренебрежимо малыми потерями	352
Вопросы и задания для самопроверки	355
Глава 14. Цепи с обратной связью	356
14.1. Определение и классификация обратных связей	356

14.2. Передаточная функция цепи с обратной связью	357
14.3. Примеры цепей с обратной связью	363
14.4. Устойчивость цепи с обратной связью	367
Вопросы и задания для самопроверки	374
Глава 15. Автоколебательные цепи	375
15.1. Физические процессы в автоколебательных цепях	375
15.2. Обобщенная схема автогенератора	378
15.3. LC -генератор с трансформаторной обратной связью. Классический метод анализа	380
15.4. LC -генератор с трансформаторной обратной связью. Операторный и частотный методы анализа	388
15.5. Трехточечные схемы генераторов	391
15.6. RC -генераторы	396
15.7. Автогенераторы с внутренней обратной связью	402
15.8. Анализ переходных процессов в автогенераторе методом медленно меняющихся амплитуд	404
Вопросы и задания для самопроверки	411
Глава 16. Проблема синтеза линейных электрических цепей	412
16.1. Постановка задачи синтеза	412
16.2. Условия физической реализуемости	414
16.3. Нормирование элементов и частоты	419
16.4. Чувствительность характеристик электрических цепей	420
16.5. Задача аппроксимации в синтезе электрических цепей	422
16.6. Задача реализации в синтезе электрических цепей. Синтез реактивных двухполюсников	425
16.7. Задача реализации в синтезе электрических цепей. Синтез четырехполюсников	432
Вопросы и задания для самопроверки	440
Глава 17. Фильтрующие цепи и их синтез	443
17.1. Классификация фильтров	443
17.2. Аппроксимация характеристик фильтров нижних частот	446
17.3. Реализация фильтров нижних частот	457
17.4. Переход от фильтров нижних частот к другим типам фильтров	464
17.5. Резонаторные фильтры	472
Вопросы и задания для самопроверки	474
Глава 18. Корректирующие цепи и их синтез	475
18.1. Принцип корректирования искажений	475
18.2. Амплитудные корректоры	481
18.3. Фазовые корректоры	496
18.4. Гармонические корректоры	505
Вопросы и задания для самопроверки	510
Глава 19. Дискретные сигналы и цепи	512
19.1. Дискретные сигналы	512
19.2. Спектр дискретного сигнала	517
19.3. Z -преобразование и его свойства	528
19.4. Дискретные цепи	538

19.5. Типовые звенья дискретных цепей	555
19.6. Метод переменных состояния дискретных цепей	559
19.7. Дискретные фильтры и их синтез	562
19.8. Цифровые фильтры	572
19.9. Эффект квантования в цифровых фильтрах	576
Вопросы и задания для самопроверки	580
Предметный указатель	585
Список литературы	591