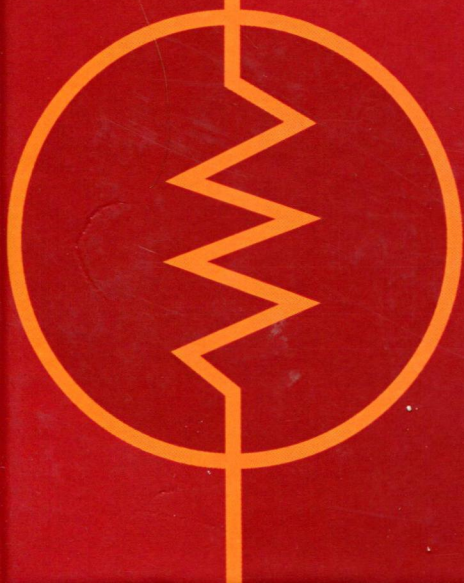


ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

А. Ф. БЕЛЕЦКИЙ



А. Ф. БЕЛЕЦКИЙ

ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

УЧЕБНИК

Издание третье, стереотипное



ЛАНЬ®
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
МОСКВА •
КРАСНОДАР •
2017 •

ББК 32.88

Б 43

Белецкий А. Ф.

Б 43 Теория линейных электрических цепей: Учебник. — 3-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 544 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-0905-1

В учебнике излагаются основные понятия, определения, законы и теоремы современной теории линейных пассивных и активных электрических цепей. Рассматриваются аналитические и численные методы решения уравнений, описывающих колебания в резистивных цепях, в цепях с сосредоточенными элементами, в цепях с распределенными элементами. Изложена теория двухполюсников, четырехполюсников и длинных линий. Рассмотрены частотные и временные характеристики электрических цепей, критерии устойчивости, различные методы анализа переходных процессов. Методы синтеза электрических цепей излагаются с учетом современной элементной базы и современных возможностей нахождения решений, близких к оптимальным.

Учебник предназначен для студентов электротехнических институтов связи.

ББК 32.88

Обложка

А. Ю. ЛАПШИН

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2017
© А. Ф. Белецкий, наследники, 2017
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2017

Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
Основные обозначения	9

Глава 1.

Основные понятия и определения теории электрических цепей	11
1.1. Напряжения и токи в электрических цепях	11
1.2. Линейные электрические цепи и принцип наложения	14
1.3. Элементы электрических цепей	15
1.4. Модель и схема электрической цепи	22
1.5. Схемы замещения типовых линейных компонентов электрических цепей	24
1.6. Основы классификации линейных электрических цепей	29
1.7. Основные понятия топологии электрических цепей	31

Глава 2.

Основные законы и теоремы теории электрических цепей	35
2.1. Первый закон Кирхгофа	35
2.2. Второй закон Кирхгофа	38
2.3. Теорема замещения	40
2.4. Теорема об эквивалентном генераторе	41
2.5. Теорема Теллгена	44
2.6. Принцип дуальности	46
2.7. Электромеханические аналогии	48

Глава 3.

Колебания в линейных резистивных электрических цепях	49
3.1. Резистивные электрические цепи	49
3.2. Параллельные и последовательные резистивные электрические цепи	50
3.3. Параллельно-последовательные резистивные электрические цепи	54
3.4. Методы уравнений Кирхгофа	57
3.5. Матричная форма записи уравнений Кирхгофа	59
3.6. Метод узловых напряжений	63
3.7. Метод контурных токов	68
3.8. Решение системы узловых уравнений	72
3.9. Теорема взаимности	73

3.10. Свойства резистивных электрических цепей	75
3.11. Применение резистивных электрических цепей	76
3.12. Машинные методы анализа резистивных электрических цепей	83

Глава 4.

Колебания в линейных электрических цепях с сосредоточенными элементами	87
---	-----------

4.1. Режимы колебаний в электрических цепях	87
4.2. Уравнения переменных состояния	89
4.3. Общее решение уравнений переменных состояния	92
4.4. Режим свободных колебаний в электрических цепях	93
4.5. Режим постоянного тока в электрических цепях	95
4.6. Расчет цепей в режиме постоянного тока	96

Глава 5.

Режим гармонических колебаний в электрических цепях	98
--	-----------

5.1. Гармонические напряжения и токи в электрических цепях	98
5.2. Наложение гармонических колебаний	101
5.3. Мгновенная и средняя мощности гармонических колебаний	103
5.4. Гармонические колебания в элементах электрических цепей	106
5.5. Гармонические колебания в последовательном RC -контуре	108
5.6. Гармонические колебания в последовательном колебательном контуре	110

Глава 6.

Символический метод анализа гармонических колебаний в электрических цепях	115
--	------------

6.1. Символическое изображение косинусоидальных функций комплексными числами	115
6.2. Основные положения символического метода анализа гармонических колебаний	119
6.3. Комплексные сопротивления и проводимости двухполюсников	122
6.4. Типичные преобразования, связанные с вычислением комплексных сопротивлений и проводимостей двухполюсников	125
6.5. Примеры применения символического метода анализа гармонических колебаний	127
6.6. Системы уравнений для комплексных амплитуд колебаний	130
6.7. Индуктивные связи в электрических цепях	134
6.8. Схемы замещения индуктивно-связанных катушек	137
6.9. Средняя, полная и реактивная мощности	140
6.10. Генераторы гармонических колебаний и режимы их использования	142
6.11. Трехфазные цепи	144

Глава 7.

Частотные характеристики электрических цепей	148
---	------------

7.1. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики электрических цепей	148
7.2. Комплексные передаточные функции электрических цепей	150
7.3. Частотные характеристики параллельного RC -контурa	153

7.4. Частотные характеристики резистивного каскада широкополосного усилителя	155
7.5. Частотные характеристики колебательных контуров	156
7.6. Применение параллельных колебательных контуров для селекции колебаний по частоте	163
7.7. Применение связанных колебательных контуров для селекции колебаний по частоте	170
7.8. Частотные характеристики цепей с транзисторами	176
7.9. Логарифмические частотные характеристики	182

Глава 8.

Классический метод анализа переходных колебаний в линейных электрических цепях с сосредоточенными элементами 185

8.1. Задача анализа переходных колебаний в линейных электрических цепях	185
8.2. Свободные колебания в цепях с одним реактивным элементом.	189
8.3. Переходные колебания в цепях с одним реактивным элементом при ступенчатых воздействиях	193
8.4. Свободные колебания в последовательном колебательном контуре	198
8.5. Свободные колебания в параллельном колебательном контуре	204
8.6. Переходные колебания в колебательных контурах при ступенчатых воздействиях.	206
8.7. Собственная и вынужденная составляющие реакции электрической цепи	208
8.8. Применение классического метода для анализа переходных колебаний в сложных линейных электрических цепях	211
8.9. Численные методы расчета переходных колебаний	214

Глава 9.

Операторный метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными элементами 218

9.1. Преобразование Лапласа	218
9.2. Основные положения операторного метода анализа переходных процессов	224
9.3. Примеры анализа переходных колебаний в простейших электрических цепях операторным методом	227
9.4. Системы уравнений для L -изображений колебаний	234
9.5. Дробные рациональные функции	237
9.6. Теоремы разложения.	238
9.7. Зависимость характера переходных колебаний от расположения полюсов их L -изображений на комплексной плоскости	241
9.8. Операторные передаточные функции электрических цепей	243
9.9. Особенности колебаний в устойчивых и неустойчивых электрических цепях	246
9.10. Критерии устойчивости	248

Глава 10.

Временный метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными элементами 254

10.1. Импульсные воздействия на электрические цепи	254
--	-----

10.2. Колебания в электрических цепях при импульсных воздействиях	256
10.3. Импульсные реакции простейших электрических цепей	258
10.4. Импульсные характеристики электрических цепей	260
10.5. Интегралы наложения	262
10.6. Интегрирующие и дифференцирующие цепи	263
10.7. Переходные характеристики электрических цепей	266
10.8. Интегралы Дюамеля	267
10.9. Область применения временных методов анализа переходных процессов	270

Глава 11.

Частотный метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными элементами	274
11.1. Анализ спектрального состава периодических колебаний	274
11.2. Спектры амплитуд и фаз периодического колебания	277
11.3. Анализ режима периодических колебаний в электрических цепях	280
11.4. Анализ частотного состава непериодического колебания	282
11.5. Спектры типичных элементов сигналов	287
11.6. Распределение энергии непериодического колебания по частоте	290
11.7. Распределение средней мощности сигналов по частоте	292
11.8. Одностороннее преобразование Фурье и частотный метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях	294
11.9. Условия безыскаженной передачи сигналов через электрическую цепь	297
11.10. Реакция идеального электрического фильтра на импульсное и ступенчатое воздействия	299
11.11. Связь между временными и частотными характеристиками электрической цепи	302

Глава 12.

Основы теории четырехполюсников	305
12.1. Четырехполюсники и их классификация	305
12.2. Уравнения передачи четырехполюсника	307
12.3. Параметры и матрицы параметров четырехполюсника	310
12.4. Зависимости между параметрами четырехполюсника	312
12.5. Параметры простейших четырехполюсников	314
12.6. Соединения четырехполюсников	321
12.7. Внешние характеристики четырехполюсников	326
12.8. Преобразователи сопротивлений	332

Глава 13.

Колебания в электрических цепях с распределенными элементами	337
13.1. Длинные линии	337
13.2. Первичные параметры длинной линии	338
13.3. Телеграфные уравнения	341
13.4. Падающие и отраженные волны в длинных линиях	343
13.5. Распределение комплексных напряжений и токов в линии	347

13.6. Уравнения передачи длинной линии	349
13.7. Уравнения передачи согласованно нагруженной линии	350
13.8. Частотные зависимости собственных параметров линии	352
13.9. Входное сопротивление длинной линии	353
13.10. Определение параметров линии по методу холостого хода и короткого замыкания	355
13.11. Передача импульсных сигналов по линиям связи	356
13.12. Групповая скорость	359

Глава 14.

Колесания в линиях без потерь	362
14.1. Длинные линии с пренебрежимо малыми потерями	362
14.2. Распределение напряжений и токов в линии без потерь	363
14.3. Режим бегущих волн в линии без потерь	364
14.4. Режим стоячих волн в линии без потерь	365
14.5. Режим смешанных волн в линии без потерь	368
14.6. Зависимость входного сопротивления линии без потерь от ее длины	369
14.7. Частотные зависимости входного сопротивления коротко- замкнутой и разомкнутой линий без потерь	371
14.8. Примеры применения длинных линий с пренебрежимо малыми потерями	372

Глава 15.

Введение в синтез линейных электрических цепей	375
15.1. Проблема синтеза линейных электрических цепей	375
15.2. Функции электрических цепей	376
15.3. Этапы решения задачи синтеза линейных электрических це- пей	377
15.4. Чувствительность характеристик электрических цепей	379
15.5. Чувствительность характеристик простейших цепей с опера- ционными усилителями	381
15.6. Нормирование переменных и параметров в задачах синтеза электрических цепей	383

Глава 16.

Входные функции электрических цепей и их реализация	384
16.1. Двухполюсники и их классификация	384
16.2. Энергетические функции	385
16.3. Положительные вещественные функции	387
16.4. Реактивные двухполюсники	390
16.5. Реактансные функции	392
16.6. Частотные зависимости сопротивления реактивных двух- полюсников	394
16.7. Реализация реактансных функций	396
16.8. Канонические схемы реактивных двухполюсников	401
16.9. Двухполюсники RC и RL	402
16.10. Реализация положительных вещественных функций	404

Глава 17.

Передаточные функции электрических цепей и их реализация	407
17.1. Свойства операторных передаточных функций электрических цепей	407
17.2. Свойства комплексных передаточных функций электрических цепей	409
17.3. Свойства передаточных функций минимально-фазовых цепей	410
17.4. Свойства передаточных функций неминимально-фазовых цепей	413
17.5. Свойства передаточных функций мостовых четырехполюсников постоянного характеристического сопротивления	415
17.6. Реализация передаточных функций мостовыми четырехполюсниками	418
17.7. Реализация передаточных функций активными RC -цепями	420
17.8. Каскадная реализация передаточных функций	424
17.9. Свойства передаточных функций лестничных нагруженных реактивных четырехполюсников	428

Глава 18.

Задача аппроксимации заданных характеристик	431
18.1. Постановка задачи	431
18.2. Методы аппроксимации, используемые в задачах синтеза электрических цепей	433
18.3. Экстремальные свойства чебышевских приближений	437
18.4. Полиномы Чебышева	438
18.5. Дроби Чебышева	440
18.6. Численные методы решения задачи аппроксимации	441

Глава 19.

Частотные характеристики электрических фильтров	444
19.1. Назначение и классификация электрических фильтров	444
19.2. Полиномиальные фильтры нижних частот с характеристиками Баттерворта	447
19.3. Полиномиальные фильтры нижних частот с характеристиками Чебышева	450
19.4. Фильтры нижних частот с характеристиками Золотарева	453
19.5. Фильтры нижних частот с оптимальным расположением всплесков ослабления	456
19.6. Фильтры верхних частот	457
19.7. Полосовые и режекторные фильтры	459
19.8. Фазовые характеристики фильтров	463

Глава 20.

Электрические фильтры	466
20.1. Лестничные LC -фильтры	466
20.2. Фильтры ARC каскадной структуры	484
20.3. Лестничные ARC -фильтры	492
20.4. Полиномиальные ARC -фильтры с чрезвенной связью	496
20.5. Фильтры с переключаемыми конденсаторами	499
20.6. Кварцевые фильтры	502

Глава 21.

Фазовращатели и линии задержки	508
21.1. Фазовращатели и их частотные характеристики	508
21.2. Фазовые звенья	511
21.3. Линии задержки	513
21.4. Линии задержки с равноволновыми частотными характеристиками	515
21.5. Линии задержки с монотонными частотными характеристиками	517

Глава 22.

Корректирующие цепи	519
22.1. Фазовые корректоры	519
22.2. Амплитудные корректоры	522
22.3. Перекрытые Т-образные амплитудные корректоры	523
22.4. Косинусные корректоры	526
22.5. Гармонические корректоры	529
Список литературы	532
Предметный указатель	533