

Н. Зернов, В. Карпов

Теория радиотехнических цепей

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Н11

Н11 **Н. Зернов**
Теория радиотехнических цепей / Н. Зернов, В. Карпов – М.: Книга по Требованию, 2023. – 894 с.

ISBN 978-5-458-49059-7

Книга содержит систематическое изложение теории электрических цепей, применяемых в радиотехнике. Рассматриваются линейные и нелинейные радиотехнические цепи и методы их анализа. Дается характеристика сигналов и их спектральный состав. На основе общей теории цепей изучаются преобразования сигналов в линейных, нелинейных и параметрических цепях. Излагается также теория автоколебательных цепей. Книга предназначена для студентов радиотехнических вузов, а также для инженеров, работающих в области радиоэлектроники.

ISBN 978-5-458-49059-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Глава первая. Общие сведения о радиотехнике и радиотехнических цепях	13
1-1. Главные задачи электротехники и радиотехники	—
1-2. Электромагнитное поле, заряды, токи	18
а) Заряды и электрическое поле. б) Токи и магнитное поле. в) Электромагнитное поле. Уравнения Максвелла. г) Энергетические соотношения в электромагнитном поле.	
1-3. Параметры электрических цепей	27
а) Сопротивление. б) Индуктивность. в) Емкость.	
1-4. Схемы цепей. Линейные и нелинейные цепи	34
1-5. Радиотехнические цепи. Режим работы цепи	36
Глава вторая. Линейные цепи постоянного тока	39
2-1. Основные сведения о цепи постоянного тока	—
2-2. Характеристики и параметры пассивных элементов цепи	40
2-3. Источник энергии (активный элемент цепи) и его эквивалентные схемы	42
а) Схема с генератором э. д. с. б) Схема с генератором тока.	
2-4. Энергетические соотношения в цепи постоянного тока	46
2-5. Линия передачи постоянного тока	52
2-6. Электромагнитное поле линии передачи постоянного тока	54
2-7. Сложные цепи. Расчет цепей постоянного тока	58
а) Входные сопротивления (проводимости). Коэффициенты передачи.	
б) Расчет сложных цепей на основе законов Кирхгофа. в) Методы контурных токов и узловых напряжений. г) Метод эквивалентного генератора (теорема Тевенена об активном двухполюснике). д) Принцип наложения (суперпозиции).	
Глава третья. Линейные цепи при гармоническом воздействии (общая теория)	83
3-1. Общие сведения о гармонических колебаниях	—
3-2. Векторные диаграммы. Основы символического метода	87
3-3. Элементарные цепи переменного тока	96
а) Элементарная цепь активного сопротивления. б) Активное сопротивление на высоких частотах. в) Элементарная емкостная цепь. г) Элементарная индуктивная цепь.	
3-4. Смешанные цепи переменного тока	118
а) Последовательная смешанная цепь. б) Энергетические соотношения в смешанной цепи переменного тока. в) Коэффициент мощности, добротность. г) Частотные характеристики активно-реактивной цепи. д) Параллельная активно-реактивная цепь.	

3-5. Эквивалентные схемы пассивного двухполюсника и их преобразования	139
3-6. Расчет сложных цепей переменного тока	143
а) Особенности расчета сложных цепей переменного тока. б) Расчет на основе законов Кирхгофа. в) Другие методы расчета.	
3-7. Магнитно-связанные цепи	149
а) Общие сведения о магнитно-связанных цепях. б) Магнитно-связанные цепи при гармоническом воздействии. Трансформатор напряжения. в) Эквивалентные схемы магнитно-связанных цепей.	
Глава четвертая. Колебательные цепи при гармоническом воздействии	159
4-1. Введение	—
4-2. Последовательный колебательный контур	161
а) Основные соотношения. б) Энергетические соотношения в колебательном контуре. Добротность контура. в) Частотные характеристики последовательного колебательного контура. г) Колебательный контур как четырехполюсник. д) Влияние параметров генератора на избирательные свойства последовательного колебательного контура.	
4-3. Параллельный колебательный контур	180
а) Основные соотношения. б) Частотные характеристики входного сопротивления параллельного колебательного контура. в) Частотные характеристики напряжения и токов параллельного колебательного контура. г) Влияние внутреннего сопротивления генератора на избирательные свойства параллельного колебательного контура. д) Сложные схемы параллельных колебательных контуров.	
4-4. Элементы колебательного контура. Границы применимости колебательных систем с сосредоточенными параметрами . .	194
4-5. Сложные реактивные двухполюсники	197
4-6. Цепочечные колебательные системы (связанные колебательные контуры)	201
а) Основные схемы. б) Входное сопротивление системы связанных контуров. Первичный ток. в) Принцип взаимности. Вторичный ток системы связанных контуров. г) Настройка системы связанных контуров. д) Энергетические соотношения в системе связанных контуров.	
4-7. Частотные характеристики системы связанных колебательных контуров	220
а) Графическое исследование. б) Уравнения частотных характеристик. в) Полоса пропускания системы связанных колебательных контуров. г) Частоты связи контуров, имеющих различные резонансные частоты.	
Глава пятая. Теория линейных четырехполюсников	238
5-1. Введение	—
5-2. Основные уравнения теории четырехполюсников. Первичные параметры четырехполюсника	239
а) Система Y (g)-параметров. б) Система Z (r)-параметров. в) Система a -параметров. г) Другие системы параметров.	
5-3. Входное и выходное сопротивления четырехполюсника . . .	250
5-4. Вторичные параметры четырехполюсника	252
а) Характеристические сопротивления. б) Коэффициент трансформации и коэффициент распространения. в) Логарифмические единицы затухания.	
5-5. Эквивалентные схемы пассивных линейных четырехполюсников	261
5-6. Четырехполюсник в системе передачи электрической энергии	265
а) Условия получения наибольшей мощности в сопротивлении нагрузки. б) Четырехполюсник как согласующий трансформатор сопротивления.	

5-7. Цепочечные схемы	269
5-8. Матрицы параметров сложных четырехполюсников	272
а) Последовательное соединение. б) Параллельное соединение. в) Последовательно-параллельное соединение. г) Параллельно-последовательное соединение.	
5-9. Основы общей теории фильтрующих четырехполюсников	276
а) Условие прозрачности фильтра. б) Граничные частоты полосы прозрачности в) Частотные характеристики фильтра.	
5-10. Фильтр нижних частот	282
а) Теория фильтра нижних частот в режиме согласования. б) Влияние сопротивления нагрузки на характеристики фильтра нижних частот.	
5-11. Фильтр верхних частот	290
5-12. Полосовой и заграждающий фильтры	293
5-13. Многозвенные фильтры	302
Глава шестая. Теория цепей с распределенными параметрами	304
6-1. Введение	—
6-2. Дифференциальные уравнения напряжения и тока в длинной линии	306
6-3. Решение телеграфных уравнений для линии без потерь	308
6-4. Решение телеграфных уравнений для линии с потерями	312
6-5. Учет граничных условий. Коэффициент отражения	314
6-6. Постоянная распространения и волновое сопротивление длинной линии с малыми потерями	316
6-7. Режим бегущих волн	322
6-8. Режим стоячих волн	325
а) Линия разомкнута на конце. б) Линия коротко замкнута на конце. в) Линия замкнута на реактивное сопротивление.	
6-9. Режим смешанных волн	335
а) Линия с активным сопротивлением на конце. б) Линия, нагруженная на комплексное сопротивление.	
6-10. Режим холостого хода и короткого замыкания в линии с потерями	341
6-11. Длинная линия как фидер	344
6-12. Линия как колебательная система	349
6-13. Колебательная система в виде короткозамкнутой линии с емкостью на входе	354
6-14. Линия как четырехполюсник	355
Глава седьмая. Линейные цепи при произвольных периодических воздействиях	358
7-1. Введение	—
7-2. Разложение периодической функции в ряд Фурье	360
7-3. Ряды Фурье четных и нечетных функций	365
7-4. Спектры простейших периодических функций	366
а) Последовательность импульсов прямоугольной формы. б) Периодические колебания треугольной формы.	
7-5. Мощность и действующее значение периодического тока сложной формы	375
7-6. Расчет отклика при несинусоидальном периодическом воздействии	377
Глава восьмая. Переходные процессы в линейных цепях	383
8-1. Введение	—
8-2. Собственные процессы и вынужденный режим	384

8-3.	Переходные процессы в цепи r, L	386
	а) Включение цепи r, L на постоянное напряжение. б) Включение цепи r, L на синусоидальное напряжение. в) Короткое замыкание цепи r, L . г) Включение цепи r, L на линейно изменяющееся напряжение.	
8-4.	Переходные процессы в цепи r, C	395
	а) Включение цепи r, C на постоянное напряжение (заряд конденсатора через сопротивление). б) Включение цепи r, C на синусоидальное напряжение. в) Разряд конденсатора на сопротивление (короткое замыкание цепи r, C).	
8-5.	Собственные процессы в цепи r, L, C	400
	а) Аперiodический процесс. б) Колебательный процесс.	
8-6.	Включение колебательного контура на постоянное напряжение	407
8-7.	Включение колебательного контура на переменное (гармоническое) напряжение	409
8-8.	Собственные колебания в системе связанных контуров	414
Глава девятая. Линейные цепи при произвольных неперiodических воздействиях		419
9-1.	Принцип суперпозиции в теории переходных процессов	—
9-2.	Метод интеграла наложения (интеграл Дюамеля)	420
	а) Цепь r, C при произвольном воздействии. б) Цепь r, L при произвольном воздействии.	
9-3.	Единичный импульс и импульсная характеристика цепи	425
9-4.	Интеграл Фурье	430
9-5.	Некоторые свойства преобразований Фурье	433
9-6.	Спектры некоторых типовых неперiodических функций	436
	а) Спектр одиночного импульса прямоугольной формы. б) Спектр экспоненциально убывающей функции. в) Спектры «гармонических» колебаний с переменными амплитудами.	
9-7.	Метод интеграла Фурье	443
9-8.	Дифференцирующие и интегрирующие цепи	444
	а) Дифференцирующие цепи. б) Интегрирующие цепи.	
9-9.	Связь между частотными и временными характеристиками линейной цепи	449
9-10.	Преобразование Лапласа	451
9-11.	Некоторые свойства преобразований Лапласа	454
9-12.	Теорема разложения	456
9-13.	Расчет переходных процессов в цепях операторным методом	457
9-14.	Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами	460
	а) Линия согласована с нагрузкой. б) Линия с произвольной нагрузкой.	
Глава десятая. Нелинейные цепи		469
10-1.	Основные свойства, характеристики и параметры нелинейных элементов	—
10-2.	Преобразование частоты в нелинейных цепях. Средняя и эффективная крутизна	477
10-3.	Неприменимость принципа наложения к нелинейным элементам. Комбинационные колебания	482
10-4.	Нелинейные активные сопротивления	485
10-5.	Нелинейные цепи постоянного тока	491
10-6.	Стабилизаторы напряжения	495

10-7.	Нелинейное активное сопротивление при гармоническом воздействии	498
	а) Метод степенного полинома. б) Метод кусочно-линейной аппроксимации (метод А. И. Берга).	
10-8.	Нелинейное сопротивление при сложном воздействии . . .	509
10-9.	Нелинейные энергоемкие элементы	512
	а) Нелинейная индуктивность. б) Расчет нелинейной магнитной цепи. в) Нелинейная емкость.	
10-10.	Нелинейное реактивное сопротивление при гармоническом воздействии	529
10-11.	Смешанные нелинейные цепи с одним энергоемким элементом	534
	а) Нелинейные дифференциальные уравнения цепей. б) Фазовые портреты. в) Расчет переходного процесса при произвольной форме воздействия.	
10-12.	Нелинейные цепи с двумя энергоемкими элементами	542
	а) Колебательный контур с нелинейным сопротивлением. Построение Льенара. б) Колебательный контур с нелинейной реактивностью. Феррорезонанс.	
Глава одиннадцатая. Случайные электрические процессы		553
11-1.	Введение	—
11-2.	Основные характеристики случайного процесса	554
11-3.	Стационарный случайный процесс	559
11-4.	Энергетический спектр стационарного случайного процесса	561
11-5.	Флюктуационные шумы	564
	а) Шумы тепловых флюктуаций. б) Шумы электронной лампы.	
Глава двенадцатая. Сигналы		570
12-1.	Введение	—
12-2.	Блок-схема радиоканала	571
12-3.	Управляющие сигналы и их основные характеристики . . .	575
12-4.	Радиосигналы	579
12-5.	Спектры радиосигналов	584
	а) Амплитудная модуляция. б) Частотная (фазовая) модуляция. в) Сравнение результатов.	
12-6.	Понятие об импульсной модуляции. Теорема Котельникова	594
12-7.	Спектры сигналов при импульсной модуляции	598
	а) Амплитудно-импульсная модуляция. б) Модуляция по длительности импульсов.	
Глава тринадцатая. Прохождение сигналов через линейные цепи . . .		606
13-1.	Введение	—
13-2.	Частотные искажения в цепи с ограниченной полосой пропускания	607
13-3.	Прохождение амплитудно-модулированных сигналов через колебательные системы	612
13-4.	Прохождение частотно-модулированных сигналов через колебательную систему	618
13-5.	Преобразование стационарного случайного процесса в линейной цепи	621
13-6.	Задерживающие цепи	624
Глава четырнадцатая. Усиление и нелинейные преобразования сигналов		629
14-1.	Введение	—
14-2.	Общие сведения об усилителях	631

14-3. Линейная теория усилителей (активных четырехполюсников)	635
14-4. Ламповый и транзисторный усилители	642
а) Ламповый усилитель. б) Транзисторный усилитель. в) Частотные характеристики апериодических (реостатных) усилителей. г) Нелинейные искажения в усилителях.	
14-5. Частотно-избирательные усилители	662
а) Резонансный усилитель в линейном режиме. б) Резонансный усилитель в нелинейном режиме.	
14-6. Умножение частоты в нелинейных цепях	669
14-7. Выпрямление	674
14-8. Детектирование в нелинейных цепях	682
14-9. Амплитудная модуляция в нелинейных цепях	692
14-10. Гетеродинирование в нелинейных цепях	701
14-11. Преобразования сигналов в цепях с нелинейными реактивными элементами	708
а) Магнитные и диэлектрические усилители. б) Энергетика преобразования сигналов в нелинейных реактивных цепях. Теорема Мэнли и Роу. в) Умножение частоты в цепи с нелинейной реактивностью.	
Глава пятнадцатая. Автоколебательные цепи	725
15-1. Определение автоколебательной цепи	—
15-2. Автоколебания и отрицательное сопротивление	726
15-3. Обратная связь в радиотехнических цепях	730
а) Основные уравнения четырехполюсника с обратной связью. б) Положительная обратная связь. в) Отрицательная обратная связь.	
15-4. Статическая устойчивость цепей с отрицательным сопротивлением	739
а) Устойчивость цепи постоянного тока с отрицательным сопротивлением. б) Устойчивость состояния колебательного контура с отрицательным сопротивлением. в) Критерий Найквиста.	
15-5. Ламповый автогенератор гармонических колебаний с обратной связью	751
15-6. Дифференциальное уравнение лампового автогенератора гармонических колебаний. Условия самовозбуждения	753
15-7. Квазилинейная теория автогенератора. Установившийся режим	758
15-8. Мягкое и жесткое самовозбуждение автогенератора	760
15-9. Установление колебаний в автогенераторе	766
15-10. Фазовые портреты автогенератора гармонических колебаний	770
15-11. Обобщенная схема автогенератора гармонических колебаний. Правило фаз и правило амплитуд	773
15-12. Устойчивость автоколебательного процесса	777
15-13. Схемы L, C -автогенераторов гармонических колебаний	780
а) Схемы L, C -автогенераторов гармонических колебаний с обратной связью. б) Схемы L, C -автогенераторов с внутренним отрицательным сопротивлением.	
15-14. Автогенераторы гармонических колебаний на R, C	797
15-15. Принципы генерирования разрывных колебаний	802
15-16. Автогенераторы релаксационных колебаний	809
а) Автогенератор на газоразрядной лампе. б) Мультивибратор. в) Блокинг-генератор.	
15-17. Воздействие внешней э. д. с. на автогенератор гармонических колебаний	819
а) Воздействие гармонической э. д. с. на потенциально автоколебательную систему. Регенерация. б) Воздействие гармонической э. д. с. на автоколебательную систему. Захватывание.	

<i>Глава шестнадцатая. Цепи с переменными параметрами.</i>	828
16-1. Введение	—
16-2. Элементарные параметрические цепи	832
а) Цепь с параметрическим активным сопротивлением. б) Цепь с параметрическим реактивным элементом.	
16-3. Энергетические процессы в цепи с параметрическим реактивным элементом	841
а) Емкостная цепь. б) Индуктивная цепь.	
16-4. Модуляция в параметрических цепях	851
а) Амплитудная модуляция. б) Частотная модуляция.	
16-5. Детектирование в параметрических цепях	858
16-6. Параметрическое усиление и самовозбуждение	861
а) Параметрическая регенерация. б) Дифференциальное уравнение параметрического колебательного контура. в) Одноконтурный параметрический усилитель. г) Двухконтурный параметрический усилитель.	
16-7. Преобразование частотных спектров в параметрических цепях	873
а) Гетеродинирование в параметрической цепи. б) Деление частоты в параметрических цепях.	
З а к л ю ч е н и е	881
П р и л о ж е н и я	884
Список использованной литературы	887
Алфавитный указатель	888

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕХНИКЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1-1. Главные задачи электротехники и радиотехники

Электротехника и радиотехника являются науками, изучающими физические процессы и технические методы использования энергии электромагнитного поля для практических целей.

Электромагнитное поле представляет собой один из видов материи. Оно характеризуется связанными между собой электрическими и магнитными явлениями, которые следует рассматривать как две стороны единого процесса.

Радиотехника, возникшая и первоначально развивавшаяся как часть электротехники, имеет с ней много общих черт, что дает основание для изучения в этой книге как электрических цепей, применяемых и в электротехнике, и в радиотехнике, так и тех цепей, которые предназначены для решения специфических задач радиотехники.

Однако назначение современной радиоаппаратуры и физические процессы, положенные в ее основу, во многом отличаются от целей и принципов действия электротехнических устройств.

Главной задачей электротехники является передача и использование электромагнитного поля для приведения в действие мощных машин, механизмов, источников света, тепла и для других энергетических преобразований.

Основная задача современной радиотехники заключается в использовании энергии электромагнитного поля для передачи на расстояние различного рода информации, т. е. сообщений о тех или иных процессах, фактах, событиях и т. п.

Аналогичные цели преследует и электропроводная связь, однако, в отличие от нее, радиотехника осуществляет передачу информации без посредства проводов между отправителем и получателем сообщений. С этой целью радиотехника использует свободно распространяющееся в пространстве электромагнитное поле, называемое полем излучения.¹

¹ Слово «радиотехника» происходит от radio — луч.

Рассмотрим несколько подробнее основные задачи, являющиеся общими для электротехники и радиотехники, а затем остановимся на тех конкретных особенностях, которые отличают их друг от друга.

Из сказанного выше следует, что как в электротехнике, так и в радиотехнике должны изучаться методы передачи электромагнитного поля из одной точки пространства в другую и способы последующего преобразования энергии поля в какой-либо иной вид энергии (механическую, акустическую, тепловую и т. п.).

Обычно говорят о передаче энергии из одного пункта в другой. Однако эти слова следует понимать условно; в действительности речь идет о перемещении в пространстве определенного вида материи, являющейся носителем энергии. В самом деле, энергия наряду с массой является неотъемлемым свойством материи, мерой ее движения. Нет материи, не обладающей массой, так же как не может быть энергии, не связанной с тем или иным материальным объектом. В электротехнике и радиотехнике таким видом материи, несущим электромагнитную энергию, и является электромагнитное поле.

Итак, общими для электротехники и радиотехники являются три основные научно-технические проблемы.

1. Генерирование электромагнитного поля (условно пользуются термином «генерирование электромагнитной энергии») посредством устройств, называемых генераторами, или передающими устройствами.

2. Передача электромагнитного поля («передача энергии») от генератора к потребителю через разделяющую их среду, которая может быть названа линией передачи.

3. Использование отправленного передающим устройством электромагнитного поля и несомой им энергии в территориально отдаленном пункте для тех или иных практических целей при помощи специального приемного устройства.

В электротехнике электромагнитное поле передается из одной точки пространства в другую вдоль проводов, соединяющих эти точки. Благодаря наличию проводов удается осуществить высокую степень концентрации электромагнитного поля и несомой им энергии в пространстве диэлектрика, окружающего провода. Поэтому приемного пункта достигает почти вся энергия, поступающая на вход линии, соединяющей генератор с потребителем. Лишь относительно небольшая часть ее расходуется (бесполезно теряется) в соединительной линии. Эти замечательные свойства переноса электромагнитного поля вдоль проводов позволяют осуществить в электротехнических системах эффективную передачу на значительные расстояния мощных электромагнитных полей и тем самым использовать их энергию для приведения в действие мощных машин, приборов, источников света, тепла и т. п.

Радиотехника позволяет решить проблему передачи энергии электромагнитного поля без помощи соединительных про-