

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ

Часть I Основы теории цепей

А. И. Астайкин, А. П. Помазков



ФГУП

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ

А.И. Астайкин, А.П. Помазков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ

Часть первая

Основы теории цепей

Под редакцией доктора технических наук,
профессора *А.И. Астайкина*

Саров 2003

ББК 32.841
А 91
УДК 621.396.1

Астайкин А.И., Помазков А.П. Теоретические основы радиотехники. Часть первая. Основы теории цепей. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003, 554 с.

ISBN 5-85165-641-7

Курс «Теоретические основы радиотехники» (ТОР) является базовой дисциплиной в процессе подготовки специалистов-радиоинженеров. Основными задачами научно-технической области, которую представляет радиотехника, являются изучение принципов возбуждения, усиления, излучения, распространения и приема электромагнитных колебаний и электромагнитных волн, относящихся к радиодиапазону, и практическое использование этих колебаний и волн для передачи, хранения и преобразования информации.

Структурно курс разделен на три части.

Часть первая – основы теории радиотехнических цепей.

Часть вторая – основы теории радиотехнических сигналов.

Часть третья – взаимодействие радиотехнических сигналов с радиотехническими устройствами (системами).

Часть первая знакомит читателя с методами исследования широкого круга радиотехнических устройств (радиотехнических цепей) с помощью упрощенных методов, основанных на замене реальных устройств квазистационарной моделью, электромагнитные процессы в которой достаточно точно и просто описываются скалярными интегральными величинами – напряжениями и токами. При этом решаются две задачи: прямая (анализ) и обратная (синтез). При решении прямой задачи анализа цепей по известной структуре и параметрам цепи находят ее характеристики, а при известном воздействии на цепь – отклики на выходе всей цепи или отдельных ее частей. При решении обратной задачи синтеза цепей по известным характеристикам цепи находят структуру этой цепи и номиналы составляющих ее элементов.

Книга рассчитана на студентов, аспирантов, инженеров и научных сотрудников, работающих в области радиотехники.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой ННГУ им. Лобачевского *А.В. Якимов*; доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой МГУ им. Огарева *В.А. Горюнов*; доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой МЭИ *В.А. Пермяков*

ISBN 5-85165-641-7

© ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003

Содержание

Список условных обозначений	14
1. Основные понятия теории цепей	23
1.1. Предмет теории цепей	23
1.2. Основные понятия и определения	24
1.2.1. Электрическая цепь, радиотехническая цепь	24
1.2.2. Электрический заряд	25
1.2.3. Поле	25
1.2.4. Электромагнитное поле	26
1.2.5. Электрический ток	26
1.2.6. Электрический потенциал	28
1.2.7. Электрическое напряжение	28
1.2.8. Электродвижущая сила	29
1.2.9. Колебательный процесс, колебания	30
1.2.10. Волновой процесс	30
1.2.11. Основные энергетические величины	30
1.3. Квазистационарные поля и системы	31
1.3.1. Уравнения Максвелла, волновые уравнения	31
1.3.2. Квазистационарные поля и системы	33
1.4. Радиотехнические цепи	36
1.4.1. Схемы радиотехнической цепи	36
1.4.2. Узлы, ветви и контуры	39
1.4.3. Знаки напряжений и токов	39
1.5. Идеальные пассивные элементы-двухполюсники	40
1.5.1. Определения	40
1.5.2. Резистор (сопротивление)	41
1.5.3. Реактивные элементы	42
1.5.4. Активные и реактивные сопротивления и проводимости	46
1.5.5. Дуальные элементы и цепи	47
1.5.6. Схемы замещения реальных элементов	48
1.6. Активные элементы цепей	49
1.6.1. Идеализированные источники энергии	49
1.6.2. Идеальный источник напряжения (генератор эдс)	49
1.6.3. Идеальный источник тока (генератор тока)	51
1.6.4. Схемы замещения реальных источников энергии	51
1.7. Основные законы электрических цепей	53
1.7.1. Основные законы теории цепей	53
1.7.2. Закон Ома	53

1.7.3. Первый закон Кирхгофа	54
1.7.4. Второй закон Кирхгофа	54
1.7.5. Принцип суперпозиции для линейных цепей	55
1.7.6. Понятие об уравнениях электрического равновесия	56
1.7.7. Классификация радиотехнических цепей	57
2. Линейные стационарные цепи при гармонических внешних воздействиях	58
2.1. Параметры и способы изображения гармонических колебаний	58
2.1.1. Понятие о гармонических колебаниях	58
2.1.2. Установившийся режим и переходные процессы	63
2.1.3. Среднее, средневывпрямленное и действующее значения гармонических колебаний	64
2.1.4. Линейные операции над гармоническими функциями	65
2.2. Метод комплексных амплитуд	67
2.2.1. Понятие о символических методах	67
2.2.2. Комплексное представление гармонических колебаний	67
2.2.3. Комплексная амплитуда	70
2.2.4. Линейные операции над комплексными амплитудами	72
2.2.5. Комплексные сопротивление и проводимость	75
2.2.6. Комплексные схемы замещения цепи	78
2.2.7. Общая схема применения метода комплексных амплитуд	79
2.3. Основные законы электрических цепей в комплексной форме	79
2.3.1. Основные законы	79
2.3.2. Закон Ома в комплексной форме	80
2.3.3. Первый закон Кирхгофа	80
2.3.4. Второй закон Кирхгофа	80
2.3.5. Принцип суперпозиции в комплексной форме	81
2.4. Идеализированные элементы R , L и C при гармонических воздействиях	81
2.4.1. Идеализированные пассивные элементы-двухполюсники	81
2.4.2. Сопротивление	82
2.4.3. Индуктивный элемент (индуктивность) L	84
2.4.4. Емкостной элемент (емкость) C	88
2.4.5. Сводная таблица входных характеристик идеальных элементов	92
2.5. Простейшие линейные цепи при гармонических воздействиях	93

2.5.1. Простейшие линейные двухполюсники	93
2.5.2. Последовательная RL -цепь	93
2.5.3. Последовательная RC -цепь	97
2.5.4. Параллельная RL -цепь	100
2.5.5. Параллельная RC -цепь	103
2.5.6. Последовательная RLC -цепь	106
2.5.7. Параллельная RLC -цепь	109
2.5.8. Реактивные двухполюсники	113
2.6. Энергетические соотношения в простейших цепях при гармонических воздействиях	114
2.6.1. Мощность гармонических колебаний в двухполюснике	114
2.6.2. Активная, реактивная, полная и комплексная мощности	116
2.6.3. Баланс мощностей в цепи	118
2.6.4. Согласование источника энергии с нагрузкой	118
2.7. Эквивалентные преобразования линейных цепей	121
2.7.1. Понятие об эквивалентных преобразованиях	121
2.7.2. Участки цепей с последовательным соединением элементов	122
2.7.3. Параллельное соединение элементов	123
2.7.4. Смешанное соединение элементов	125
2.7.5. Преобразование лестничных цепей	126
2.7.6. Преобразование четырехполюсников к T - и Π -образным схемам	129
2.7.7. Эквивалентные преобразования T - и Π -образных схем друг в друга	131
2.7.8. Последовательная и параллельная схемы замещения пассивного двухполюсника	132
2.7.9. Эквивалентные преобразования активных двухполюсников (источников колебаний)	135
2.8. Цепи с взаимной индуктивностью (индуктивной связью)	142
2.8.1. Понятие взаимной индуктивности	142
2.8.2. Коэффициент связи между индуктивными катушками	145
2.8.3. Цепи с взаимоиндукцией при гармонических воздействиях	145
2.8.4. Эквивалентные преобразования цепей с взаимоиндуктивностями	146
2.8.5. Трансформаторы	148
2.8.6. Трансформация комплексных токов и напряжений	149
2.8.7. Трансформация комплексных сопротивлений	151
2.9. Скин-эффект при гармоническом воздействии	153
2.9.1. Явление скин-эффекта в проводниках	153

2.9.2. Распределение плотности тока в поперечном сечении проводника	155
2.9.3. Расчет сопротивления проводника переменному току.	156
3. Методы расчета сложных цепей	158
3.1. Сложная цепь	158
3.2. Расчет цепей на основе законов Кирхгофа	159
3.2.1. Законы Кирхгофа	159
3.2.2. Подсчет числа независимых уравнений	160
3.2.3. Расчет цепей на основе законов Кирхгофа	162
3.3. Метод контурных токов	163
3.3.1. Сущность метода контурных токов	163
3.3.2. Общая формулировка метода контурных токов	165
3.4. Метод узловых напряжений	170
3.4.1. Анализ цепи методом узловых напряжений	170
3.4.2. Общие соотношения в методе узловых напряжений	173
3.5. Основные теоремы теории линейных цепей	177
3.5.1. Теорема наложения	178
3.5.2. Теорема взаимности	179
3.5.3. Теорема компенсации	181
3.5.4. Теоремы об эквивалентных источниках энергии	182
4. Частотные характеристики линейных цепей	186
4.1. Понятие о комплексных частотных характеристиках	186
4.1.1. Понятие о комплексных частотных характеристиках	186
4.1.2. Входные и передаточные КЧХ	186
4.1.3. Входные и передаточные характеристики четырехполюсников	188
4.2. Избирательность и резонансные явления в линейных цепях	190
4.2.1. Понятие избирательности (фильтрации по частоте)	190
4.2.2. Понятие резонанса в электрических цепях	191
4.2.3. Эквивалентные схемы замещения	192
4.3. Последовательный колебательный контур	193
4.3.1. Эквивалентная схема замещения контура	193
4.3.2. Входные сопротивление и проводимость, резонансная частота, добротность	194
4.3.3. Векторные диаграммы последовательного контура	198
4.3.4. Передаточные характеристики контура	199
4.3.5. Энергетические соотношения на резонансной частоте	202
4.3.6. Избирательные свойства контура	204

4.3.7. Влияние внутреннего сопротивления генератора эдс на избирательные свойства контура	206
4.3.8. Влияние нагрузки R_n на избирательные свойства контура	207
4.4. Параллельный колебательный контур	208
4.4.1. Виды параллельных колебательных контуров	208
4.4.2. Эквивалентная схема замещения	209
4.4.3. Входные характеристики, резонансная частота, добротность	210
4.4.4. Векторные диаграммы напряжений и токов	215
4.4.5. Передаточные характеристики контура	217
4.4.6. Энергетические соотношения в контуре на резонансной частоте	219
4.4.7. Избирательные свойства контура	220
4.4.8. Влияние внутреннего сопротивления генератора тока на избирательные свойства контура	220
4.4.9. Влияние нагрузки на избирательные свойства контура	221
4.4.10. Входные частотные характеристики параллельных контуров других видов	221
4.5. Связанные колебательные контуры	223
4.5.1. Схемы связанных контуров, коэффициент связи	223
4.5.2. Эквивалентные схемы замещения, первичный и вторичный токи	225
4.5.3. Анализ вносимых сопротивлений, частоты связи	229
4.5.4. Анализ частот связи	232
4.5.5. Оптимальный коэффициент связи	237
4.5.6. Входные частотные характеристики	242
4.5.7. Частотная характеристика вторичного тока	245
4.5.8. Частотный коэффициент передачи	246
4.5.9. Полоса пропускания системы СКК	249
5. Линейные четырехполюсники, электрические фильтры	252
5.1. Определения, классификация, системы параметров	252
5.1.1. Определения	252
5.1.2. Классификация четырехполюсников	253
5.1.3. Системы первичных параметров четырёхполюсников	254
5.1.4. Основные уравнения в различных системах параметров	254
5.2. Физический смысл первичных параметров	256
5.2.1. Система Y -параметров	256
5.2.2. Система Z -параметров	258

5.2.3. Система A -параметров	260
5.3. Связь между первичными параметрами различных систем	261
5.3.1. Матрицы взаимных четырехполюсников	261
5.3.2. Связь между различными матрицами ЧП	263
5.4. Характеристики нагруженных четырехполюсников	264
5.4.1. Схема нагруженного ЧП	264
5.4.2. Внешние характеристики четырехполюсников	264
5.4.3. Выражения характеристик ЧП через элементы A -матрицы	265
5.4.4. Характеристики ЧП в системе Z -параметров	266
5.5. Вторичные (характеристические) параметры четырехполюсников	267
5.5.1. Вторичные (характеристические) параметры	267
5.5.2. Характеристическое сопротивление	267
5.5.3. Коэффициент трансформации	268
5.5.4. Характеристическая постоянная передачи	269
5.5.5. Выражение первичных параметров через вторичные	270
5.6. Эквивалентные схемы пассивных четырехполюсников	272
5.6.1. Канонические схемы четырехполюсников	272
5.6.2. Связь первичных параметров с элементами T -образной схемы ЧП	273
5.6.3. Связь первичных параметров с элементами Π -образной схемы ЧП	274
5.6.4. Расчетные соотношения для первичных и вторичных параметров	274
5.7. Основные понятия об электрических частотных фильтрах	276
5.7.1. Понятия о частотных фильтрах	276
5.7.2. Типы фильтров	276
5.7.3. Методы расчета и синтеза фильтров	277
5.7.4. Эквивалентные схемы	278
5.7.5. Основные задачи теории фильтров	279
5.8. Основные соотношения фильтрующих цепей (фильтров)	279
5.8.1. Эквивалентные схемы	279
5.8.2. Условия существования полосы прозрачности	279
5.8.3. Выражения для граничных частот	280
5.8.4. Уравнения частотных характеристик в полосе прозрачности	281
5.8.5. Уравнения частотных характеристик в полосе подавления (непрозрачности)	281
5.8.6. Эквивалентные схемы фильтров	282
5.8.7. Характеристические сопротивления	283

5.9. Фильтры нижних частот	284
5.9.1. Определение структуры фильтра	284
5.9.2. Граничные частоты	285
5.9.3. Уравнения частотных характеристик	286
5.9.4. Характеристические сопротивления	287
5.9.5. Расчет элементов фильтра	288
5.10. Фильтры верхних частот	289
5.10.1. Определение структуры фильтра	289
5.10.2. Граничные частоты	290
5.10.3. Уравнения частотных характеристик	291
5.10.4. Характеристические сопротивления	292
5.10.5. Расчет элементов фильтра	293
5.11. Полосно-пропускающий фильтр	293
5.11.1. Определение структуры фильтра	293
5.11.2. Работа ППФ в режиме хх на выходе	295
5.11.3. Граничные частоты, ширина полосы прозрачности	296
5.11.4. Уравнения частотных характеристик	298
5.11.5. Характеристические сопротивления	299
5.11.6. Расчет элементов фильтра в режиме согласования	300
5.12. Полосно-заграждающий фильтр	301
5.12.1. Определение структуры фильтра	301
5.12.2. Частотные характеристики	302
5.12.3. Расчет элементов фильтра	303
6. Линейные цепи с распределенными параметрами (длинные линии)	304
6.1. Понятие цепей с распределенными параметрами	304
6.1.1. Цепи с сосредоточенными параметрами	304
6.1.2. Цепи с распределенными параметрами	306
6.1.3. Классификация цепей с распределенными параметрами	307
6.2. Телеграфные уравнения длинной линии	309
6.2.1. Исходные положения для вывода уравнений	309
6.2.2. Телеграфные уравнения длинной линии	311
6.3. Решение телеграфных уравнений	315
6.3.1. Решение волновых уравнений в общем виде	315
6.3.2. Решение волнового уравнения для гармонического напряжения	319
6.3.3. Решение для тока. Волновое сопротивление	320
6.3.4. Скорость распространения волны	321
6.3.5. Коэффициент отражения, входное сопротивление	322
6.3.6. Распределение напряжения и тока в линии	325
6.4. Волновые параметры длинной линии	326
6.4.1. Волновые параметры	326

6.4.2. Бегущая, падающая и отраженная волны, коэффициент отражения	327
6.4.3. Стоячие и смешанные волны, КСВ, входное сопротивление	328
6.4.4. Постоянная распространения	329
6.4.5. Фазовая и групповая скорости	331
6.4.6. Длина волны	331
6.4.7. Волновое сопротивление	332
6.5. Расчет погонных параметров линии	332
6.5.1. Погонные первичные параметры линии	332
6.5.2. Расчет погонных параметров линии	333
6.5.3. Расчет погонных параметров коаксиальной линии путем решения уравнений Максвелла	334
6.6. Режимы работы длинной линии	338
6.6.1. Режимы работы длинной линии	338
6.6.2. Режим бегущей волны	340
6.6.3. Режим нагружения на активное сопротивление	341
6.6.4. Режим нагружения на реактивную нагрузку	348
6.6.5. Нагружение линии на комплексную нагрузку	351
6.6.6. Режим холостого хода	353
6.6.7. Режим короткого замыкания	358
6.7. Линия как трансформатор сопротивлений	362
6.8. Резонансные явления в длинных линиях	363
6.8.1. Эквивалентные схемы замещения	363
6.8.2. Особенности работы линий в режимах кз и хх	363
6.8.3. Резонансные явления в длинных линиях	367
6.8.4. Эквивалентные схемы замещения линии в режиме короткого замыкания	368
6.8.5. ЭСЗ линии в режиме холостого хода	375
6.8.6. Расчет параметров эквивалентных колебательных контуров	377
6.8.7. Связь постоянной затухания линии с декрементом затухания колебательного контура	390
7. Нелинейные резистивные цепи	393
7.1. Нелинейные элементы и их характеристики	393
7.1.1. Нелинейные цепи и элементы	393
7.1.2. Внешние характеристики НЭ	394
7.1.3. Резистивные нелинейные элементы	396
7.1.4. Параметры резистивных НЭ	397
7.1.5. Задачи анализа нелинейных цепей	398
7.1.6. Методы представления вольт-амперных характеристик	399
7.2. Графические методы анализа нелинейных цепей	399
7.2.1. Последовательное и параллельное соединение нелинейных резисторов	399

7.2.2. Включение активных источников в нелинейный двухполусник	400
7.2.3. Определение рабочих точек резистивных НЭ	402
7.2.4. Реакция резистивного НЭ на произвольное внешнее воздействие	403
7.3. Аппроксимация ВАХ резистивных НЭ	404
7.3.1. Задачи аппроксимации	404
7.3.2. Кусочно-линейная аппроксимация	405
7.3.3. Степенная аппроксимация	407
7.3.4. Аппроксимация показательной функцией	408
7.4. Нелинейные резистивные элементы при гармонических внешних воздействиях	409
7.4.1. Принцип решения задачи	409
7.4.2. Понятие о режимах малого и большого сигналов	412
7.4.3. Определение тока НЭ при степенной аппроксимации ВАХ	413
7.4.4. Определение тока НЭ при кусочно-линейной аппроксимации	415
8. Синтез линейных цепей	418
8.1. Задачи синтеза цепей	418
8.1.1. Две задачи теории цепей	418
8.1.2. Физическая реализуемость характеристик цепи	419
8.1.3. Синтез двухполусников и четырехполусников	420
8.1.4. Этапы синтеза	420
8.1.5. Характеристики (функции) цепей	421
8.2. Аналитические свойства входных функций	423
8.2.1. Представление операторных входных функций	423
8.2.2. Аналитические свойства входных функций	425
8.3. Цепи с одним энергоемким элементом	434
8.3.1. Особенности цепей с одним энергоемким элементом	434
8.3.2. Частотные характеристики цепей с одним энергоемким элементом	437
8.4. Реактивные двухполусники и их свойства	438
8.4.1. Реактивные двухполусники	438
8.4.2. Общий вид входных функций РД	445
8.4.3. Канонические схемы РД	449
8.5. Синтез двухполусников	452
8.5.1. Классическая задача синтеза	452
8.5.2. Основная идея синтеза	452
8.6. Синтез двухполусников с одним энергоемким элементом	453

8.6.1. Схемы двухполюсников с одним энергоемким элементом	453
8.6.2. Особенности входных функций	454
8.6.3. Синтез одноэлементных двухполюсников	455
8.6.4. Синтез двухэлементных двухполюсников	455
8.6.5. Синтез трехэлементных двухполюсников	457
8.7. Синтез двухэлементных реактивных двухполюсников	459
8.7.1. Канонические схемы и методы их реализации	459
8.7.2. Входные функции двухэлементного РД	463
8.7.3. Синтез двухэлементных РД	464
9. Переходные процессы в линейных цепях	466
9.1. Переходные процессы в цепях с сосредоточенными параметрами	466
9.1.1. Возникновение переходных процессов	466
9.1.2. Законы коммутации	467
9.1.3. Переходной, вынужденный и свободные процессы	468
9.1.4. Общий подход к анализу переходных процессов	471
9.2. Методы анализа переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами	472
9.2.1. Методы анализа переходных процессов	472
9.2.2. Классический метод анализа переходных процессов	473
9.2.3. Операторный метод анализа переходных процессов	475
9.2.4. Спектральный метод анализа переходных процессов	480
9.2.5. Временные методы анализа переходных процессов	482
9.3. Собственные колебания в цепях с одним энергоемким элементом	490
9.3.1. Особые точки в характеристиках цепи	490
9.3.2. Нахождение свободных колебаний (классический метод)	493
9.3.3. Собственные колебания в цепях с одним энергоемким элементом	494
9.3.4. Разряд емкости через резистор	494
9.3.5. Короткое замыкание RL -цепи	497
9.4. Собственные колебания в колебательном контуре	499
9.4.1. Дифференциальное уравнение собственных колебаний и его решение	499
9.4.2. Исследование решения дифференциального уравнения для тока	501
9.4.3. Частота свободных колебаний	504

9.4.4. Напряжения на элементах контура	505
9.4.5. Затухание колебаний в контуре	506
9.4.6. Собственные колебания в контуре без потерь	508
9.5. Собственные колебания в связанных колебательных контурах	509
9.5.1. Схемы для анализа свободных колебаний	509
9.5.2. Дифференциальные уравнения свободных колебаний	509
9.5.3. ЭСЗ для четной и нечетной мод	512
9.5.4. Решение дифференциального уравнения	512
9.6. Понятие об устойчивости линейных цепей	517
9.6.1. Линейные динамические системы	517
9.6.2. Устойчивость линейных динамических схем	519
9.6.3. Устойчивость активных линейных систем	519
9.7. Переходные процессы в цепях с сосредоточенными параметрами	520
9.7.1. Переходные процессы	520
9.7.2. Включение в RL -цепь постоянного напряжения	520
9.7.3. Включение в RL -цепь гармонического напряжения	522
9.7.4. Включение в RC -цепь постоянного напряжения	524
9.7.5. Включение в RC -цепь гармонического напряжения	525
9.7.6. Включение в RC -цепь экспоненциального импульса	527
9.7.7. Включение в RC -цепь последовательности прямоугольных видеоимпульсов	528
9.7.8. Включение постоянного напряжения в колебательный контур	530
9.7.9. Включение гармонической эдс в колебательный контур	532
9.8. Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами	536
9.8.1. Общее решение телеграфных уравнений регулярной длинной линии	536
9.8.2. Возникновение волн с прямоугольным фронтом	541
9.8.3. Включение в линию импульсного напряжения	548

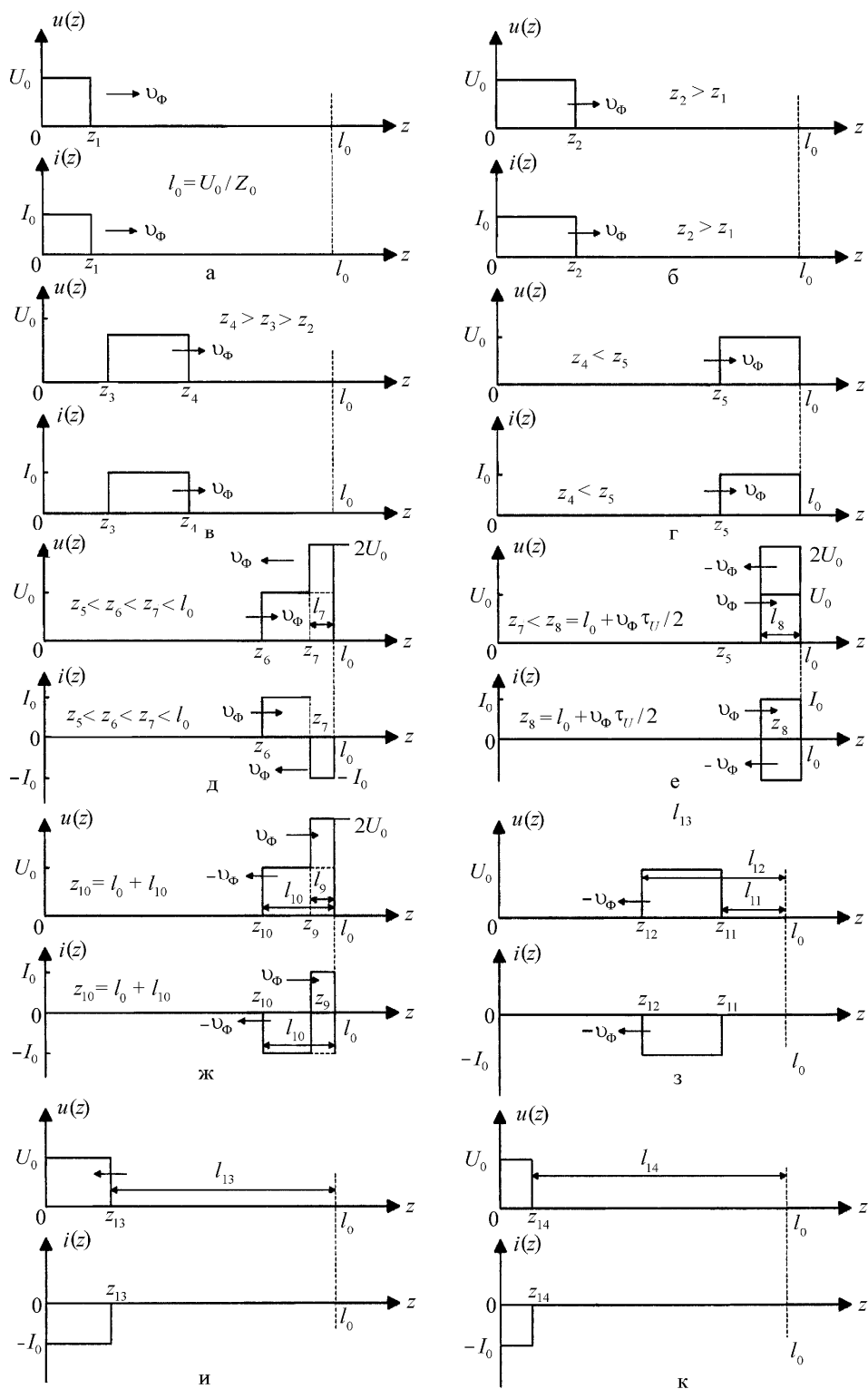


Рис. 9.60

между точками $Z_7 \leq Z \leq l_0$ равен $i(z) = i_{\text{пад}}(z) - i_{\text{отр}}(z) = U_0 / Z_0 - U_0 / Z_0 = 0$, так как $\Gamma_i = -1$. Отраженные импульсы напряжения и тока двигаются в противоположном оси z направлении.

Рис. 9.60,е. Передний фронт импульса отразился от конца линии и находится в точке $Z_8 = l_0 + l_8$, задний фронт находится в той же точке $Z_8 = l_0 + l_8$. Половина импульса отразилась и движется в обратном направлении, а половина движется в положительном направлении. Импульс в линии занимает пространственное положение $l_0 + l_8 = Z_8$, полная длительность импульса $\tau_{u8} = \tau_u / 2$. Напряжение импульса везде равно $U(z) = U_{\text{пад}}(z) + U_{\text{отр}}(z) = 2U_0$; ток импульса равен $i(z) = i_{\text{пад}}(z) - i_{\text{отр}}(z) = U_0 / Z_0 - U_0 / Z_0 = 0$. Отраженные и падающие импульсы имеют прямоугольные фронты.

Рис. 9.60,ж. Передний фронт импульса отразился и находится в точке $Z_{10} = l_0 + l_{10}$, задний фронт находится в той же точке $Z_9 = l_0 + l_9 < l_0 + l_{10}$ и движется к концу линии; передний фронт движется в обратном направлении к началу линии. Напряжение импульса в точках $Z_9 \leq Z \leq l_0$ равно $u(z) = u_{\text{пад}}(z) + U_{\text{отр}}(z) = 2U_0$, в точках $Z_{10} \leq Z \leq Z_9$ равно $u(z) = u_{\text{отр}}(z) = U_0$; ток импульса в точках $Z_9 \leq Z \leq l_0$ равно $i(z) = i_{\text{пад}}(z) - i_{\text{отр}}(z) = 0$, в точках $Z_{10} < Z < Z_9$ равно $i(z) = -i_{\text{отр}}(z) = -U_0 / Z_0$.

Рис. 9.60,з. Импульс полностью отразился от конца линии и движется как отраженная волна в обратном направлении с прямоугольными фронтами. Передний фронт импульса находится в точке Z_{12} , задний – в точке Z_{11} ; $Z_{12} < Z_{11}$, но $l_0 + l_{12} > l_0 + l_{11}$. Напряжение импульса в точках $Z_{12} < Z < Z_{11}$ равно $u(z) = u_{\text{отр}}(z) = U_0$, ток в этих точках $i(z) = -i_{\text{отр}}(z) = -U_0 / Z_0$.

Рис. 9.60,и. Отраженный импульс передним фронтом подошел к точке $z = 0$, задний фронт находится в точке Z_{13} , пространственное положение импульса в линии $l_u = 2l_0 - (l_0 + l_{13}) = v_{\phi} \tau_u$. Напряжение импульса $u(z) = u_{\text{отр}}(z) = U_0$, ток импульса $i(z) = -i_{\text{отр}}(z) = -U_0 / Z_0$.

Рис. 9.60,к. Задний фронт импульса находится в точке Z_{14} , передний «вошел» в генератор $e(t)$. Пространственная длина импульса $l_{u14} = 2l_0 - (l_0 + l_{14}) < v_{\phi} \tau_u$. Напряжение импульса $u(z) = u_{\text{отр}}(z) = U_0$, ток импульса $i(z) = -i_{\text{отр}}(z) = -U_0 / Z_0$. После того как задний фронт импульса достигнет начала линии в точке $z = 0$ и напряжение и ток в линии станут нулевыми, действие падающего отраженного импульсов прекратятся.

Такой переходный процесс существуют в линии в том случае, если внутреннее сопротивление R_i генератора $e(t)$ в начале линии $z = 0$ равно волновому сопротивлению линии Z_0 , т.е. $R_i = Z_0$. Если же $R_i \neq Z_0$, то от начала линии появятся отражения, пришедший отраженный от конца линии импульс отразится от начала линии $z = 0$, и переходный процесс повторится снова в том же порядке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харкевич А.А. Основы радиотехники. М.: Радио и связь, 1962.
2. Гольдфайн И.А. Векторный анализ и теория поля. М.: Физматгиз, 1962.
3. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. М.: Наука, 1965.
4. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972.
5. Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 1985.
6. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1987.
7. Баскаков С.И. Лекции по теории цепей. М.: Росвузнаука. МЭИ. 1991.
8. Зевеки Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975.
9. Лосев А.К. Линейные радиотехнические цепи. М.: Высшая школа, 1971.
10. Кугушев А.М., Голубева Н.С. Основы радиоэлектроники. М.: Энергия, 1969.
11. Матвеев А.Н. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980.
12. Зиновьев А.Л., Филиппов Л.И. Введение в теорию сигналов и цепей. М.: Высшая школа, 1975.
13. Иццоки Я.С. Импульсные устройства. М.: Сов. радио, 1959.
14. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988.
15. Асеев Б.П. Колебательные цепи. М.: Радио и связь, 1955.
16. Попов П.А. Расчет частотных электрических фильтров. М.: Энергия, 1966.
17. Маттей Г.Л., Янг Я., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971.
18. Альбац М.Е. Справочник по расчету фильтров и линий задержки. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
19. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.
20. Знаменский А.Е., Теплюк И.Н. Активные RC-фильтры. М.: Связь, 1970.
21. Зевеки Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989.
22. Матханов П.Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1976.
23. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Сов. радио, 1957.
24. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969.
25. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1988.

26. О.С. Милованов, Н.П. Собенин. Техника СВЧ. М.: Атомиздат, 1980.
27. Тихонов А.Н., Васильев А.Б., Свешников А.Г. Дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1980.
28. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Физматгиз, 1958.
29. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1981.
30. Брунов Б.Я., Гольденберг Л.М., Кляцкин И.Г., Цейтлин Л.А. Теория электромагнитного поля. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
31. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Госфизматизд, 1959.
32. Белицкий А.Ф. Теоретические основы электропроводной связи, Часть III. М.: Связь и радио, 1959.
33. Гилемин Е.А. Синтез пассивных цепей. М.: Связь, 1970.
34. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1992.
35. Баскаков С.И. Основы электродинамики. М.: Сов. радио, 1973.
36. Льюисел У. Связанные и параметрические колебания в электронике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.

Теоретические основы радиотехники

А.И. Астайкин, А.П. Помазков

Часть первая

Основы теории цепей

Редактор *Н.П. Мишкина*

Корректор *Е.А. Коваленко*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *Н.Ю. Солук*

Подписано в печать 10.07.2003 Формат 70х108/16
 Усл. печ. л. 48 Уч. изд. л. 36 Тираж 300 экз. Зак. тип. 1796-2002
 ПД № 00568 от 22.05.2000

Отпечатано в ИПК ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ
 607190, г. Саров Нижегородской обл.