

УЧЕБНИК

ДЛЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА РАДИОТЕХНИКА



Теория электрических цепей



Н. И. Смирнов
В. В. Фриск

Оглавление

Предисловие.....	3
Глава 1. Основные понятия, используемые в Теории электрических цепей, и методы расчета резистивных цепей.....	6
1.1. Основные понятия, используемые в ТЭЦ.....	6
1.1.1. Электрическое напряжение.....	6
1.1.2. Характеристики электрических напряжений.....	6
1.1.3. Изучение формы напряжения с помощью осциллографа.....	7
1.1.4. Сигналы гармонической формы.....	8
1.1.5. Сигналы неизменные во времени.....	9
1.1.6. Периодическая последовательность импульсов прямоугольной формы.....	10
1.1.7. Временное и спектральное представление сигналов.....	10
1.1.8. Электрическая цепь.....	11
1.2. Работа электрического тока.....	13
1.3. Мощность электрического тока.....	14
1.3.1. Средняя мощность электрического тока.....	14
1.3.2. Действующие значения тока, напряжения и ЭДС.....	15
1.3.3. Соотношение между максимальным значением гармонического тока i и его действующим значением I	15
1.3.4. Определение действующего значения тока для сигналов произвольной формы.....	16
1.4. Резистивные разветвленные и неразветвленные цепи.....	18
1.4.1. Неразветвленные электрические цепи.....	18
1.4.2. Распределение потенциалов в цепи.....	21
1.5. Баланс мощностей в цепи с источниками напряжения.....	21
1.6. Разветвленные цепи.....	22
1.6.1. Первый закон Кирхгофа.....	22
1.6.2. Результирующее сопротивление параллельно включенных резисторов.....	23
1.6.3. Распределение тока в параллельных ветвях.....	24
1.6.4. Преобразование резисторов, соединенных треугольником, в звезду, а соединенных звездой — в треугольник.....	25
1.6.5. Топологические графы цепи.....	26
1.7. Цепи с источниками тока и источниками напряжения.....	27

1.7.1. Сравнение цепей с источниками тока с цепями с ЭДС.....	27
1.7.2. Расчет мощности в цепях с источником тока.....	28
1.7.3. Зависимые и независимые источники напряжения и тока	28
1.8. Методы расчета резистивных цепей	29
1.8.1. Использование 1-го и 2-го законов Кирхгофа для расчета резистивных цепей, содержащих источники напряжения и источники тока	29
1.8.2. Метод расщепления источников тока в резистивных цепях	31
1.8.3. Расчет цепей методом контурных токов	32
1.8.4. Метод узловых потенциалов (узловых напряжений)	33
1.8.5. Метод эквивалентного генератора (метод холостого тока (ХХ) и короткого замыкания (КЗ)	35
1.8.6. Метод наложения (метод суперпозиций).....	36
1.8.7. Метод двух узлов	42
1.8.8. Принцип взаимности (теорема взаимности)	43
1.8.9. Методика расчета входного сопротивления цепи	45
1.9. Расчет электрических цепей с активными элементами	46
1.9.1. Определение активных элементов.....	46
1.9.2. Особенности применения операционных усилителей	47
1.9.3. Использование в схеме с операционным усилителем отрицательной обратной связи (ООС).....	47
1.9.4. Эквивалентная схема устройства с ОУ и ООС	48
1.10. Коэффициент передачи четырехполюсника	49
1.10.1. Коэффициент передачи четырехполюсника по напряжению	49
1.10.2. Делитель напряжения с плавающей регулировкой	50
Контрольные вопросы.....	51
Глава 2. Электрические цепи с накопителями энергии ..	52
2.1. Особенности элементов электрических цепей, накапливающих энергию	52
2.1.1. Сопротивления цепей с различными элементами.....	52
2.1.2. Сопротивление элементов, накапливающих энергию	53
2.1.3. Определение формы тока в C -цепях и L -цепях.....	53
2.1.4. Закон изменения мгновенного сопротивления конденсатора	55
2.2. Дуальные цепи	55
2.2.1. Доказательство справедливости дуальных соотношений ..	55
2.3. Воздействие гармонического напряжения на емкостные цепи.....	57

2.3.1. Определение закона изменения тока в цепи при воздействии гармонического напряжения	57
2.3.2. Векторное представление гармонических сигналов	58
2.4. Воздействие гармонического напряжения на индуктивные цепи	59
2.5. Правила построения векторных диаграмм на комплексной плоскости	60
2.5.1. Параллельное соединение элементов RLC -цепи	60
2.5.2. Последовательное соединение RLC -элементов	60
2.6. Расчет RLC -цепей комплексным (символическим) методом при гармоническом воздействии	61
2.6.1. Правила перехода от записи мгновенных значений к комплексным выражениям	61
2.7. Схемы замещения	65
2.8. Исследование входной фазовой характеристики RC -цепи при изменении емкости от 0 до ∞	66
Контрольные вопросы	69
Глава 3. RLC-цепи при воздействии гармонического сигнала с меняющейся частотой	71
3.1. Входные и передаточные характеристики RLC -цепей	71
3.2. Комплексная передаточная функция RLC -цепи	72
3.3. Комплексное входное сопротивление в линейных RLC -цепей	73
3.4. Комплексное входное сопротивление неразветвленных RL -и RC -цепей	74
3.4.1. Входные АЧХ и ФЧХ разветвленной RC -цепи	74
3.4.2. Амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики комплексного входного сопротивления RC -цепи	76
3.5. Входные амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики разветвленных цепей с одним накопителем энергии	77
3.5.1. Входные АЧХ и ФЧХ разветвленной RC -цепи	77
3.6. Комплексная передаточная функция цепей Г-образного вида	79
3.7. Общее правило построения передаточных фазочастотных характеристик RLC -цепей	80
3.7.1. Выводы по фазо-частотным характеристикам неразветвленных RLC -цепи	82
Контрольные вопросы	82
Глава 4. Резонансные явления в RLC-цепях	83

4.1. Общее положение для последовательных и параллельных колебательных контуров.....	83
4.2. Последовательный колебательный контур.....	84
4.2.1. Частотные характеристики последовательной RLC -цепи.....	85
4.2.2. Определение резонансной частоты $\omega_{\text{рез}}$ последовательного колебательного контура.....	85
4.2.3. Характеристическое сопротивление последовательного колебательного контура.....	86
4.2.4. Взаимосвязь ω_0 и $\omega_{\text{рез}}$	86
4.3. Расстройки частоты в колебательных контурах относительно резонансной частоты.....	87
4.3.1. Виды расстроек частоты в колебательном контуре.....	87
4.3.2. Обобщенная расстройка ξ	87
4.3.3. Три важных частных случая значения обобщенной расстройки.....	88
4.4. Входные характеристики последовательного пассивного колебательного контура.....	89
4.4.1. Входная амплитудно-частотная характеристика последовательного пассивного колебательного контура.....	89
4.4.2. Входная фазо-частотная характеристика последовательного пассивного колебательного контура.....	90
4.5. Передаточные характеристики последовательного пассивного колебательного контура.....	92
4.5.1. Комплексная передаточная характеристика последовательного пассивного колебательного контура.....	92
4.5.2. Амплитудно-частотная характеристика передаточной функции последовательного колебательного контура.....	92
4.5.3. Фазо-частотная характеристика передаточной функции последовательного колебательного контура.....	93
4.6. Избирательные свойства последовательного колебательного контура.....	94
4.6.1. Полоса пропускания последовательного колебательного контура.....	94
4.6.2. Граничная частота последовательного колебательного контура.....	95
4.6.3. Фазо-частотная характеристика комплексного входного сопротивления последовательного колебательного контура.....	96
4.6.4. Расчет избирательности последовательного колебательного контура.....	96
4.7. Резонансные явления в пассивном параллельном колебательном контуре.....	97

4.7.1. Определение резонансной частоты параллельного колебательного контура	97
4.7.2. Входные частотные характеристики параллельного колебательного контура на резонансной частоте	100
4.7.3. Комплексное входное сопротивление параллельного колебательного контура при расстройке по частоте относительно резонансной частоты	101
4.7.4. Определение модуля тока в емкостной ветви параллельного колебательного контура при резонансе	102
4.7.5. Передаточные характеристики параллельного колебательного контура	103
Контрольные вопросы	107
Глава 5. Индуктивно-связанные цепи	109
5.1. Понятие о взаимной индуктивности	109
5.2. Коэффициент связи катушек индуктивности	110
5.3. Согласное и встречное включение катушек индуктивности	111
5.4. Расчет токов в контурах воздушного трансформатора методом замены двухконтурной цепи эквивалентной цепью с вносимыми сопротивлениями	112
5.5. Резонанс в индуктивно связанных цепях	114
Контрольные вопросы	117
Глава 6. Прохождение негармонических сигналов через электрическую RLC-цепь	118
6.1. Разложение периодических негармонических сигналов на гармонические составляющие	118
6.2. Закон разложения периодического негармонического напряжения в ряд Фурье	120
6.3. Последовательность операций при разложении в ряд Фурье периодической негармонической кривой $u(t)$	120
6.4. Использование знания видов симметрии периодических негармонических сигналов их спектров	121
6.5. Разложение типовых периодических сигналов в ряды Фурье	122
6.5.1. Синусоидальная кривая	122
6.5.2. Периодическая кривая треугольной формы	123
6.5.3. Кривая последовательности импульсов прямоугольной формы со скважностью 2 (меандр)	124
6.5.4. Кривая однополупериодной формы	124
6.5.5. Периодическая кривая двухполупериодной формы	125
6.5.6. Выводы по анализу спектров периодических сигналов	125

6.6. Спектры последовательностей импульсов прямоугольной формы с различными скважностями	126
6.6.1. Определение амплитуды k -й гармоники при разложении в ряд Фурье периодической последовательности прямоугольных импульсов	126
6.6.2. Понятие «Первый ноль»	128
6.6.3. Спектры периодической последовательности импульсов прямоугольной формы при изменении скважности S	128
6.6.4. Выводы по анализу АЧС периодической последовательности импульсов	132
Контрольные вопросы	132
Глава 7. Прохождение сигналов через нелинейные электрические цепи	134
7.1. Радиоэлементы электрических цепей линейные и нелинейные	134
7.2. Спектры тока на выходе нелинейных элементов с различными вольт-амперными характеристиками	136
7.3. Нелинейные схемы для получения удвоенной и утроенной частоты, а также гармоник большей частоты	137
7.3.1. Схема для удвоения частоты	137
7.3.2. Схема для получения утроенной частоты и гармоник большей частоты	138
7.4. Коэффициент оценки отличия формы сигнала от гармонического сигнала	140
7.4.1. Коэффициент амплитуды K_A	140
7.4.2. Коэффициент искажения сигнала $K_{иск}$	140
7.5. Форма тока в чисто реактивных элементах цепи	142
7.5.1. Воздействие напряжения последовательности импульсов прямоугольной формы со скважностью 2 (меандра) на L -цепь ..	142
7.5.2. Форма тока в C -цепи при входном напряжении последовательности импульсов, прямоугольной формы типа меандр ...	143
7.6. Определение формы тока имеющего равномерный спектр с нечетными гармониками в C -цепи при входном сигнале типа меандр	144
Контрольные вопросы	144
Глава 8. Переходные процессы в RLC-цепях	145
8.1. Переходной процесс в RL -цепи	145
8.2. Уравнения мгновенных напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в RL -цепи при включении на постоянное напряжение U	146
8.2.1. Вынужденная составляющая тока	147

8.2.2. Свободная составляющая тока	147
8.3. Кривые изменения вынужденного и свободного тока в RL -цепи	149
8.4. Закон изменения мгновенных напряжений на резистивном сопротивлении R в RL -цепи	149
8.5. Закон изменения мгновенных напряжений на индуктивности	150
8.6. Постоянная времени RL -цепи и скорость изменения свободных составляющих	151
8.6.1. Скорость убывания свободных составляющих в RL -цепи	152
8.6.2. Пример определения практического времени переходного процесса	143
8.7. Включение RC -цепи на постоянное напряжение	154
8.8. Закон изменения сопротивлений элементов, накапливающих энергию во время переходного процесса	155
8.8.1. Сопротивление энергонакапливающего индуктивного элемента	155
8.8.2. Закон изменения модуля сопротивления энергонакапливающего емкостного элемента в переходном режиме	156
8.9. Разряд заряженного конденсатора на резистивное сопротивление R	157
8.9.1. Изменение напряжения и тока во время разряда конденсатора	157
8.9.2. Определение энергии, выделяющейся на сопротивлении R во время переходного процесса при разряде конденсатора на R	158
8.10. RLC -цепи при переходном процессе при разряде заряженного конденсатора	159
8.10.1. Последовательность расчета RLC -цепей в переходном режиме при разряде конденсатора	159
8.10.2. Составление для RLC -цепи уравнения по 2-му закону Кирхгофа для мгновенных значений тока и напряжения при разряде заряженного конденсатора	159
8.10.3. Анализ 1-го случая разряда заряженного конденсатора, т. е. когда $R < 2\rho$ и когда корни характеристического уравнения $K_{1,2} = -a \pm j\omega_{св}$	161
8.11. Практическое время переходного процесса $t_{пер}$	161
8.12. Определения падения напряжения на индуктивности в RLC -цепи	165
8.13. Операторный метод расчета переходных процессов	166
8.13.1. Формула разложения	170
8.13.2. Пример с использованием формулы разложения (8.18) ..	171

8.14. Расчет цепей в переходном режиме при ненулевых начальных условиях	172
<i>Контрольные вопросы</i>	174
Глава 9. Спектры непериодических сигналов	176
9.1. Введение	176
9.2. Комплексная спектральная плотность непериодического сигнала	177
9.2.1. Методика расчета комплексного спектра единичной функции	177
9.2.2. Методика расчета комплексного спектра экспоненты	178
9.2.3. Расчет комплексного спектра с использованием таблиц перехода от изображения к оригиналу	179
9.2.4. Методика расчета комплексного спектра импульсной функции	179
9.3. Методы расчета откликов при непериодических сигналах .	180
9.3.1. Отклик от одиночного прямоугольного импульса на выходе интегрирующей цепи	180
9.3.2. Переходная характеристика цепи	181
9.4. Интеграл Дюамеля	183
<i>Контрольные вопросы</i>	184
Глава 10. Анализ процессов в электрических цепях с распределенными параметрами	186
10.1. Изучение свойств электрических цепей с распределенными параметрами при учете их геометрических размеров	186
10.2. Длинные линии	188
10.3. Первичные параметры длинной линии	188
10.4. Телеграфные уравнения длинной линии и их общее решение для режима гармонических колебаний	190
10.5. Вторичные параметры длинной линии	192
10.6. Уравнение длинной линии в гиперболических функциях ...	193
10.7. Уравнение передачи для длинной линии без потерь	194
10.8. Примеры расчета входного сопротивления линий без потерь с помощью MATLAB и SCILAB	195
10.9. Падающие и отраженные волны	199
10.9.1. Коэффициент бегущей волны	207
10.9.2. Коэффициент стоячей волны	208
<i>Контрольные вопросы</i>	208
Глава 11. Частотно-избирательные аналоговые электрические фильтры	209

11.1. Назначение и классификация электрических фильтров	209
11.2. Аппроксимация полиномами Баттерворта характеристик частотно-избирательных фильтров	210
11.3. Аппроксимация полиномами Чебышева характеристик частотно-избирательных фильтров	218
<i>Контрольные вопросы</i>	232
Глава 12. Методы расчета цифровых фильтров	233
12.1. Достоинства цифровых фильтров	233
12.2. Основные теоретические сведения по цифровой обработке сигналов	234
12.2.1. Аналоговые и дискретные сигналы	234
12.2.2. Дискретизация и квантование	234
12.2.3. Дискретные сигналы	235
12.2.4. Теорема Котельникова (теорема отсчетов)	236
12.2.5. Спектры дискретных сигналов. Преобразование Фурье .	237
12.2.6. Дискретное преобразование Лапласа	238
12.2.7. Z-преобразование	238
12.2.8. Цифровые фильтры. Системная функция	239
12.2.9. Устойчивость. Нули и полюсы передаточной функции фильтра	244
12.2.10. Частотные характеристики цифровых фильтров	244
12.2.11. Синтез цифровых фильтров	245
12.3. Упражнения и задачи по цифровой обработке сигналов цифровыми фильтрами	248
12.4. Формулы амплитудно-частотного спектра одиночных импульсов различной формы и формулы геометрических прогрессий	273
12.4.1. Спектральные плотности наиболее часто используемых импульсов	273
12.4.2. Формулы геометрической прогрессий	265
<i>Контрольные вопросы</i>	274
Список сокращений	275
Литература	276