

УДК 621.373(075)

ББК 32.88

С50

Рецензенты: зав. кафедрой ТКС МИЭТа (НИУ), канд. техн. наук *А. А. Бахтин*; доктор техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана *В. Н. Митрохин*; и.о. зав. кафедрой ТЭЦ МТУСИ, канд. техн. наук *Е. Д. Григорьева*; профессор кафедры ТЭЦ МТУСИ, канд. техн. наук *В. Н. Соболев*

**Смирнов Н. И., Фриск В. В.**

**С50** Теория электрических цепей: конспект лекций. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 270 с.: ил.

**ISBN 978-5-9912-0573-3.**

В конспективной и доступной форме изложены основы теории линейных и нелинейных электрических цепей во временной и спектральной областях. Подробно рассмотрены методы расчета электрических цепей при постоянном токе и гармонических воздействиях, в стационарных и переходных режимах, влияние нелинейных цепей на прохождение гармонического сигнала. Рассмотрены резонансные явления, характеристики пассивных и активных частотно-избирательных фильтров с применением компьютерных методов их расчета. Анализируются спектры сигналов различной формы. Представлена теория цепей с распределенными параметрами. Отдельная глава посвящена цифровой обработке сигналов и методам расчета цифровых фильтров.

Для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Радиотехника» (бакалавр), будет полезно магистрам, аспирантам и инженерно-техническим работникам, а также учащимся техникумов и колледжей соответствующих направлений подготовки.

**ББК 32.88**

*Все права защищены.*

*Любая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения правообладателя*

© ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

[www.techbook.ru](http://www.techbook.ru)

© Н. И. Смирнов, В. В. Фриск

# Оглавление

Предисловие .....	3
<b>Глава 1. Основные понятия, используемые в Теории электрических цепей, и методы расчета резистивных цепей .....</b>	<b>6</b>
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 прямо- угольной 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).....	30
1.8.7. Метод двух узлов.....	42
1.8.8. Принцип взаимности (теорема взаимности) .....	43
1.8.9. Методика расчета входного сопротивления цепи .....	44
1.9. Расчет электрических цепей с активными элементами .....	45
1.9.1. Определение активных элементов.....	45
1.9.2. Особенности применения операционных усилителей .....	46
1.9.3. Использование в схеме с операционным усилителем отрицательной обратной связи (ООС).....	47
1.9.4. Эквивалентная схема устройства с ОУ и ООС .....	47
1.10. Коэффициент передачи четырехполюсника .....	49
1.10.1. Коэффициент передачи четырехполюсника по напряжению .....	49
1.10.2. Делитель напряжения с плавающей регулировкой.....	49
<b>Глава 2. Электрические цепи с накопителями энергии ..</b>	<b>51</b>
2.1. Особенности элементов электрических цепей, накапливающих энергию .....	51
2.1.1. Сопротивления цепей с различными элементами.....	51
2.1.2. Сопротивление элементов, накапливающих энергию.....	52
2.1.3. Определение формы тока в С-цепях и L-цепях.....	52
2.1.4. Закон изменения мгновенного сопротивления конденсатора .....	54
2.2. Дуальные цепи .....	54
2.2.1. Доказательство справедливости дуальных соотношений ..	54
2.3. Воздействие гармонического напряжения на емкостные цепи.....	56

2.3.1. Определение закона изменения тока в цепи при воздействии гармонического напряжения .....	56
2.3.2. Векторное представление гармонических сигналов.....	57
2.4. Воздействие гармонического напряжения на индуктивные цепи .....	58
2.5. Правила построения векторных диаграмм на комплексной плоскости .....	59
2.5.1. Параллельное соединение элементов $RLC$ -цепи.....	59
2.5.2. Последовательное соединение $RLC$ -элементов .....	59
2.6. Расчет $RLC$ -цепей комплексным (символическим) методом при гармоническом воздействии .....	60
2.6.1. Правила перехода от записи мгновенных значений к комплексным выражениям.....	61
2.7. Схемы замещения.....	64
2.8. Исследование входной фазовой характеристики $RC$ -цепи при изменении емкости от 0 до $\infty$ .....	65
<b>Глава 3. <math>RLC</math>-цепи при воздействии гармонического сигнала с меняющейся частотой .....</b>	<b>69</b>
3.1. Входные и передаточные характеристики $RLC$ -цепей.....	69
3.2. Комплексная передаточная функция $RLC$ -цепи .....	70
3.3. Комплексное входное сопротивление в линейных $RLC$ -цепей.....	71
3.4. Комплексное входное сопротивление неразветвленных $RL$ -и $RC$ -цепей .....	72
3.4.1. Входные АЧХ и ФЧХ разветвленной $RC$ -цепи .....	72
3.4.2. Амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики комплексного входного сопротивления $RC$ -цепи .....	74
3.5. Входные амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики разветвленных цепей с одним накопителем энергии .....	75
3.5.1. Входные АЧХ и ФЧХ разветвленной $RC$ -цепи .....	75
3.6. Комплексная передаточная функция цепей Г-образного вида .....	77
3.7. Общее правило построения передаточных фазочастотных характеристик $RLC$ -цепей.....	78
3.7.1. Выводы по фазо-частотным характеристикам неразветвленных $RLC$ -цепи .....	80
<b>Глава 4. Резонансные явления в <math>RLC</math>-цепях.....</b>	<b>81</b>
4.1. Общее положение для последовательных и параллельных колебательных контуров.....	81

4.2. Последовательный колебательный контур.....	82
4.2.1. Частотные характеристики последовательной $RLC$ -цепи .	83
4.2.2. Определение резонансной частоты $\omega_{\text{рез}}$ последовательного колебательного контура.....	83
4.2.3. Характеристическое сопротивление последовательного колебательного контура.....	84
4.2.4. Взаимосвязь $\omega_0$ и $\omega_{\text{рез}}$ .....	84
4.3. Расстройки частоты в колебательных контурах относительно резонансной частоты.....	85
4.3.1. Виды расстроек частоты в колебательном контуре.....	85
4.3.2. Обобщенная расстройка $\xi$ .....	85
4.3.3. Три важных частных случая значения обобщенной расстройки.....	86
4.4. Входные характеристики последовательного пассивного колебательного контура.....	87
4.4.1. Входная амплитудно-частотная характеристика последовательного пассивного колебательного контура.....	87
4.4.2. Входная фазо-частотная характеристика последовательного пассивного колебательного контура.....	88
4.5. Передаточные характеристики последовательного пассивного колебательного контура.....	90
4.5.1. Комплексная передаточная характеристика последовательного пассивного колебательного контура.....	90
4.5.2. Амплитудно-частотная характеристика передаточной функции последовательного колебательного контура.....	90
4.5.3. Фазо-частотная характеристика передаточной функции последовательного колебательного контура.....	91
4.6. Избирательные свойства последовательного колебательного контура.....	92
4.6.1. Полоса пропускания последовательного колебательного контура.....	92
4.6.2. Граничная частота последовательного колебательного контура.....	93
4.6.3. Фазо-частотная характеристика комплексного входного сопротивления последовательного колебательного контура.....	94
4.6.4. Расчет избирательности последовательного колебательного контура.....	94
4.7. Резонансные явления в пассивном параллельном колебательном контуре.....	95
4.7.1. Определение резонансной частоты параллельного колебательного контура.....	95

4.7.2. Входные частотные характеристики параллельного колебательного контура на резонансной частоте.....	98
4.7.3. Комплексное входное сопротивление параллельного колебательного контура при расстройке по частоте относительно резонансной частоты.....	99
4.7.4. Определение модуля тока в емкостной ветви параллельного колебательного контура при резонансе.....	100
4.7.5. Передаточные характеристики параллельного колебательного контура.....	101
<b>Глава 5. Индуктивно-связанные цепи.....</b>	<b>105</b>
5.1. Понятие о взаимной индуктивности.....	105
5.2. Коэффициент связи катушек индуктивности.....	106
5.3. Согласное и встречное включение катушек индуктивности.....	107
5.4. Расчет токов в контурах воздушного трансформатора методом замены двухконтурной цепи эквивалентной цепью с вносимыми сопротивлениями.....	108
5.5. Резонанс в индуктивно связанных цепях.....	110
<b>Глава 6. Прохождение негармонических сигналов через электрическую <math>RLC</math>-цепь.....</b>	<b>114</b>
6.1. Разложение периодических негармонических сигналов на гармонические составляющие.....	114
6.2. Закон разложения периодического негармонического напряжения в ряд Фурье.....	116
6.3. Последовательность операций при разложении в ряд Фурье периодической негармонической кривой $u(t)$ .....	116
6.4. Использование знания видов симметрии периодических негармонических сигналов их спектров.....	117
6.5. Разложение типовых периодических сигналов в ряды Фурье.....	118
6.5.1. Синусоидальная кривая.....	118
6.5.2. Периодическая кривая треугольной формы.....	119
6.5.3. Кривая последовательности импульсов прямоугольной формы со скважностью 2 (меандр).....	120
6.5.4. Кривая однополупериодной формы.....	120
6.5.5. Периодическая кривая двухполупериодной формы.....	121
6.5.6. Выводы по анализу спектров периодических сигналов....	121
6.6. Спектры последовательностей импульсов прямоугольной формы с различными скважностями.....	122
6.6.1. Определение амплитуды $k$ -й гармоники при разложении в ряд Фурье периодической последовательности прямоугольных импульсов.....	122

6.6.2. Понятие «Первый нуль» .....	124
6.6.3. Спектры периодической последовательности импульсов прямоугольной формы при изменении скважности $S$ .....	124
6.6.4. Выводы по анализу АЧС периодической последовательности импульсов .....	128
<b>Глава 7. Прохождение сигналов через нелинейные электрические цепи</b> .....	129
7.1. Радиоэлементы электрических цепей линейные и нелинейные .....	129
7.2. Спектры тока на выходе нелинейных элементов с различными вольт-амперными характеристиками .....	131
7.3. Нелинейные схемы для получения удвоенной и утроенной частоты, а также гармоник большей частоты .....	132
7.3.1. Схема для удвоения частоты .....	132
7.3.2. Схема для получения утроенной частоты и гармоник большей частоты .....	133
7.4. Коэффициент оценки отличия формы сигнала от гармонического сигнала .....	135
7.4.1. Коэффициент амплитуды $K_A$ .....	135
7.4.2. Коэффициент искажения сигнала $K_{иск}$ .....	135
7.5. Форма тока в чисто реактивных элементах цепи .....	137
7.5.1. Воздействие напряжения последовательности импульсов прямоугольной формы со скважностью 2 (меандра) на $L$ -цепь .	137
7.5.2. Форма тока в $C$ -цепи при входном напряжении последовательности импульсов, прямоугольной формы типа меандр ...	138
7.6. Определение формы тока имеющего равномерный спектр с нечетными гармониками в $C$ -цепи при входном сигнале типа меандр .....	139
<b>Глава 8. Переходные процессы в <math>RLC</math>-цепях</b> .....	140
8.1. Переходной процесс в $RL$ -цепи .....	140
8.2. Уравнения мгновенных напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в $RL$ - цепи при включении на постоянное напряжение $U$ .....	141
8.2.1. Вынужденная составляющая тока .....	142
8.2.2. Свободная составляющая тока .....	142
8.3. Кривые изменения вынужденного и свободного тока в $RL$ - цепи .....	144
8.4. Закон изменения мгновенных напряжений на резистивном сопротивлении $R$ в $RL$ -цепи .....	144
8.5. Закон изменения мгновенных напряжений на индуктивности .....	145

8.6. Постоянная времени $RL$ -цепи и скорость изменения свободных составляющих .....	146
8.6.1. Скорость убывания свободных составляющих в $RL$ -цепи ..	147
8.6.2. Пример определения практического времени переходного процесса .....	148
8.7. Включение $RC$ -цепи на постоянное напряжение .....	149
8.8. Закон изменения сопротивлений элементов, накапливающих энергию во время переходного процесса .....	150
8.8.1. Сопротивление энергонакапливающего индуктивного элемента .....	150
8.8.2. Закон изменения модуля сопротивления энергонакапливающего емкостного элемента в переходном режиме .....	151
8.9. Разряд заряженного конденсатора на резистивное сопротивление $R$ .....	152
8.9.1. Изменение напряжения и тока во время разряда конденсатора .....	152
8.9.2. Определение энергии, выделяющейся на сопротивлении $R$ во время переходного процесса при разряде конденсатора на $R$ ..	153
8.10. $RLC$ -цепи при переходном процессе при разряде заряженного конденсатора .....	154
8.10.1. Последовательность расчета $RLC$ -цепей в переходном режиме при разряде конденсатора .....	154
8.10.2. Составление для $RLC$ -цепи уравнения по 2-му закону Кирхгофа для мгновенных значений тока и напряжения при разряде заряженного конденсатора .....	154
8.10.3. Анализ 1-го случая разряда заряженного конденсатора, т. е. когда $R < 2\rho$ и когда корни характеристического уравнения $K_{1,2} = -a \pm j\omega_{св}$ .....	156
8.11. Практическое время переходного процесса $t_{пер}$ .....	159
8.12. Определения падения напряжения на индуктивности в $RLC$ -цепи .....	160
8.13. Операторный метод расчета переходных процессов .....	161
8.13.1. Формула разложения .....	165
8.13.2. Пример с использованием формулы разложения (8.18) ..	166
8.14. Расчет цепей в переходном режиме при ненулевых начальных условиях .....	167
<b>Глава 9. Спектры непериодических сигналов .....</b>	<b>170</b>
9.1. Введение .....	170
9.2. Комплексная спектральная плотность непериодического сигнала .....	171



9.2.1. Методика расчета комплексного спектра единичной функции .....	171
9.2.2. Методика расчета комплексного спектра экспоненты .....	172
9.2.3. Расчет комплексного спектра с использованием таблиц перехода от изображения к оригиналу .....	173
9.2.4. Методика расчета комплексного спектра импульсной функции .....	173
9.3. Методы расчета откликов при непериодических сигналах .	174
9.3.1. Отклик от одиночного прямоугольного импульса на выходе интегрирующей цепи .....	174
9.3.2. Переходная характеристика цепи .....	175
9.4. Интеграл Дюамеля .....	177
<b>Глава 10. Анализ процессов в электрических цепях с распределенными параметрами .....</b>	<b>179</b>
10.1. Изучение свойств электрических цепей с распределенными параметрами при учете их геометрических размеров .....	179
10.2. Длинные линии .....	181
10.3. Первичные параметры длинной линии .....	181
10.4. Телеграфные уравнения длинной линии и их общее решение для режима гармонических колебаний .....	183
10.5. Вторичные параметры длинной линии .....	185
10.6. Уравнение длинной линии в гиперболических функциях...	186
10.7. Уравнение передачи для длинной линии без потерь .....	187
10.8. Примеры расчета входного сопротивления линий без потерь с помощью MATLAB .....	188
10.9. Падающие и отраженные волны .....	190
10.9.1. Коэффициент бегущей волны .....	196
10.9.2. Коэффициент стоячей волны .....	197
<b>Глава 11. Частотно-избирательные аналоговые электрические фильтры .....</b>	<b>198</b>
11.1. Назначение и классификация электрических фильтров ....	198
11.2. Аппроксимация полиномами Баттерворта характеристик частотно-избирательных фильтров .....	199
11.3. Аппроксимация полиномами Чебышева характеристик частотно-избирательных фильтров .....	206
<b>Глава 12. Цифровая обработка сигналов и методы расчета цифровых фильтров .....</b>	<b>218</b>
12.1. Достоинства цифровых фильтров .....	218

12.2. Основные теоретические сведения по цифровой обработке сигналов .....	219
12.2.1. Аналоговые и дискретные сигналы .....	219
12.2.2. Дискретизация и квантование .....	219
12.2.3. Дискретные сигналы .....	220
12.2.4. Теорема Котельникова (теорема отсчетов) .....	221
12.2.5. Спектры дискретных сигналов. Преобразование Фурье .	223
12.2.6. Дискретное преобразование Лапласа .....	223
12.2.7. Z-преобразование .....	223
12.2.8. Цифровые фильтры. Системная функция.....	224
12.2.9. Устойчивость. Нули и полюсы передаточной функции фильтра.....	229
12.2.10. Частотные характеристики цифровых фильтров .....	229
12.2.11. Синтез цифровых фильтров .....	230
12.3. Упражнения и задачи по цифровой обработке сигналов цифровыми фильтрами.....	232
12.4. Формулы амплитудно-частотного спектра импульсов различной формы и формулы геометрических прогрессий ....	257
12.4.1. Спектральные плотности наиболее часто используемых импульсов.....	257
12.4.2. Формулы геометрической прогрессий.....	258
Список сокращений .....	259
Литература.....	260