



Д. А. Улахович

# Основы теории линейных электрических цепей



bhv



**Д. А. Улахович**

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Рекомендовано УМО по образованию  
в области телекоммуникаций в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению подготовки дипломированных  
специалистов 210400 — «Телекоммуникации»

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2009

УДК 681.3.06(075.8)  
ББК 32.973я73  
У47

**Улахович Д. А.**

У47 Основы теории линейных электрических цепей: Учеб. пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 816 с.: ил. — (Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-9775-0083-8

Книга основана как на классическом, так и на современном анализе и оптимальном синтезе линейных электрических цепей. Уделено внимание изучению основ теории и практики активных цепей, цепей с обратной связью, а также условиям физической реализуемости и проблемам устойчивости цепей. Рассмотрена теория и практика применения диплексоров. Изложены основные положения современного синтеза волновых аналоговых фильтров на фазовых контурах.

*Для студентов всех форм обучения, аспирантов, преподавателей вузов и инженеров*

УДК 681.3.06(075.8)  
ББК 32.973я73

Рецензенты:

Ю. А. Брюханов, д. т. н., проф., заслуженный деятель науки, проректор по науке Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова

Е. Б. Соловьева, д. т. н., проф., заведующая кафедрой теоретических основ электротехники СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

### Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Евгений Тertiшников</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Юрий Рожко</i>
Компьютерная верстка	<i>Натальи Караваевой</i>
Корректор	<i>Виктория Пиотровская</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Фото	<i>Кирилла Сергеева</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 12.01.09.

Формат 70×100<sup>1/16</sup>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 65,79.

Тираж 2000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию  
№ 77.99.60.953.Д.003650.04.08 от 14.04.2008 г. выдано Федеральной службой  
по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ГУП "Типография "Наука"  
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-9775-0083-8

© Улахович Д. А., 2009

© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2009

# Оглавление

Предисловие.....	1
Основные обозначения .....	3
Принятые сокращения .....	7
<b>ЧАСТЬ I. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....</b>	<b>9</b>
<b>Глава 1. Основные понятия и законы теории электрических цепей.....</b>	<b>11</b>
<b>Лекция 1. Основные определения и понятия теории электрических цепей .....</b>	<b>13</b>
1.1. Предмет дисциплины .....	13
1.2. Напряжения и токи в электрических цепях.....	14
1.3. Классификация электрических цепей.....	17
1.4. Определение линейной стационарной цепи (системы).....	21
1.5. Модель и схема электрической цепи .....	22
<b>Лекция 2. Элементы топологии электрических цепей. Законы Кирхгофа.....</b>	<b>24</b>
2.1. Основные топологические понятия теории электрических цепей.....	24
2.1.1. Граф электрической цепи .....	24
2.1.2. Аналитическое описание графа .....	28
2.2. Законы Кирхгофа .....	30
2.3. Краткая характеристика задач анализа и синтеза электрических цепей.....	34
<b>Лекция 3. Элементы электрических цепей .....</b>	<b>36</b>
3.1. Элементы электрических цепей и их свойства .....	36
3.1.1. Пассивные элементы.....	36
3.1.2. Источники (активные элементы).....	42

3.3. Схемы замещения реальных элементов ЭЦ .....	46
3.3. Параллельные и последовательные соединения однотипных элементов. Принцип эквивалентности .....	49
3.3.1. Параллельные соединения .....	49
3.3.3. Последовательные соединения .....	52
<b>Глава 2. Общие методы анализа электрических цепей .....</b>	<b>55</b>
<b>Лекция 4. Расчёт резистивных электрических цепей в статическом режиме.....</b>	<b>57</b>
4.1. Расчёт последовательных электрических цепей (делители напряжений) .....	58
4.2. Расчёт параллельных электрических цепей (делители токов) .....	59
4.3. Расчёт параллельно-последовательных электрических цепей .....	60
4.3.1. Расчёт параллельно-последовательных электрических цепей с одним источником .....	61
4.3.2. Расчёт параллельно-последовательных электрических цепей с несколькими источниками .....	63
4.4. Расчёт электрических цепей методами уравнений Кирхгофа .....	65
4.4.1. Метод токов ветвей .....	65
4.4.2. Метод напряжений ветвей .....	67
<b>Лекция 5. Методы анализа сложных электрических цепей.....</b>	<b>69</b>
5.1. Метод узловых напряжений .....	69
5.1.1. Составление узловых уравнений .....	71
5.1.2. Особенности составления узловых уравнений .....	73
5.2. Метод контурных токов .....	75
5.2.1. Составление контурных уравнений .....	76
5.2.2. Особенности составления контурных уравнений .....	80
5.3. Решение системы контурных (узловых) уравнений .....	81
5.3.1. Основные понятия теории определителей .....	81
5.3.2. Применение теории определителей для решения контурных (узловых) уравнений .....	85
5.3.3. Примеры использования теории определителей .....	86
<b>Лекция 6. Основные теоремы теории цепей .....</b>	<b>88</b>
6.1. Теоремы взаимности (обратимости) .....	88
6.2. Теоремы об эквивалентных генераторах .....	91
6.2.1. Теорема об эквивалентном генераторе с источником напряжения (теорема Тевенина) .....	92

6.2.2. Теорема об эквивалентном генераторе с источником тока (теорема Нортона) .....	94
6.2.3. Условия эквивалентности двух схем замещения генераторов .....	95
6.2.4. Примеры .....	96
<b>Глава 3. Режим гармонических колебаний в линейных электрических цепях .....</b>	<b>101</b>
<b>Лекция 7. Гармонические напряжения и токи .....</b>	<b>103</b>
7.1. Определение гармонических напряжений и токов .....	104
7.1.1. Основные определения .....	104
7.1.2. Линейные операции над гармоническими колебаниями .....	106
7.1.3. Энергетические характеристики гармонических колебаний .....	109
7.2. Символическое изображение гармонических колебаний .....	112
7.3. Законы Ома и Кирхгофа для комплексных амплитуд .....	116
7.4. Комплексные сопротивления и проводимости .....	118
7.5. Комплексные числа и операции над ними .....	120
7.5.1. Арифметические действия над комплексными числами .....	120
7.5.2. Геометрический смысл комплексных чисел .....	122
7.5.3. Формулы Эйлера и Муавра .....	123
<b>Лекция 8. Символический метод анализа электрических цепей .....</b>	<b>125</b>
8.1. Комплексные сопротивления и проводимости элементов электрических цепей .....	125
8.1.1. Резистивный элемент .....	125
8.1.2. Индуктивность .....	126
8.1.3. Ёмкость .....	128
8.1.4. Комплексные сопротивления и проводимости двухполюсников .....	129
8.2. Анализ установившихся гармонических колебаний в простейших цепях .....	133
8.2.1. Определения режимов состояния электрической цепи .....	133
8.2.2. Анализ гармонических колебаний в последовательном <i>RL</i> -контуре .....	134
8.2.3. Анализ гармонических колебаний в <i>RLC</i> -контуре .....	136
8.3. Анализ сложных линейных электрических цепей в режиме установившихся гармонических колебаний .....	137
8.4. Особенности составления уравнений цепей с индуктивными связями .....	139
8.4.1. Основные соотношения .....	139
8.4.2. Метод развязки индуктивных связей .....	141

<b>Лекция 9. Энергетические характеристики двухполюсников .....</b>	<b>144</b>
9.1. Средняя, полная и реактивная мощности при гармонических колебаниях в цепи.....	144
9.2. Максимум средней мощности в нагрузке .....	148
9.2.1. Условия баланса мощностей .....	148
9.2.2. Условия максимума средней мощности в нагрузке.....	149
9.2.3. Коэффициент полезного действия генератора. Согласованная нагрузка .....	152
<b>Глава 4. Частотные характеристики электрических цепей.....</b>	<b>155</b>
<b>Лекция 10. Комплексные функции электрических цепей.....</b>	<b>157</b>
10.1. Определение комплексных функций электрических цепей .....	158
10.2. Расчёт частотных характеристик .....	162
10.3. Логарифмические частотные характеристики .....	166
<b>Лекция 11. Режим гармонических колебаний в последовательном колебательном контуре .....</b>	<b>170</b>
11.1. Параметры последовательного контура .....	170
11.1.1. Ток в последовательном контуре.....	171
11.1.2. Свойства последовательного контура при резонансе.....	173
11.2. Частотные характеристики последовательного контура .....	176
11.2.1. Комплексная частотная характеристика по току .....	176
11.2.2. Резонансные характеристики последовательного контура.....	178
<b>Лекция 12. Режим гармонических колебаний в параллельном колебательном контуре .....</b>	<b>182</b>
12.1. Параметры параллельного контура.....	182
12.2. Резонансные характеристики параллельного контура.....	186
<b>Лекция 13. Свойства частотных характеристик колебательных контуров.....</b>	<b>190</b>
13.1. Общие свойства частотных характеристик .....	190
13.1.1. Понятия о расстройках колебательного контура .....	191
13.1.2. Свойства резонансной частоты .....	191
13.2. Избирательность простейших колебательных контуров .....	194
13.2.1. Полоса пропускания.....	195
13.2.2. Связь полосы пропускания с вторичными параметрами .....	197
13.2.3. Управление шириной полосы пропускания параллельного колебательного контура с помощью шунта.....	199

<b>Лекция 14. Частотные характеристики сложных колебательных контуров.....</b>	<b>201</b>
14.1. Некоторые разновидности параллельных колебательных контуров....	201
14.1.1. Параллельный контур с малыми потерями в катушке индуктивности .....	201
14.1.2. Параллельный контур с малыми потерями в катушке индуктивности и конденсаторе.....	205
14.2. Связанные колебательные контуры .....	206
14.2.1. Коэффициент связи .....	207
14.2.2. Комплексные амплитуды токов связанных контуров .....	208
14.2.3. Настройки связанных контуров .....	209
14.2.4. Частотная зависимость тока во вторичном контуре .....	211
14.2.5. Частотные свойства связанных контуров .....	214
14.2.6. Полоса пропускания связанных контуров .....	217
<b>Глава 5. Временные и частотные характеристики линейных электрических цепей .....</b>	<b>221</b>
<b>Лекция 15. Описание линейных электрических цепей во временной области .....</b>	<b>223</b>
15.1. Типовые воздействия на электрические цепи.....	223
15.1.1. Единичный скачок (ступенчатое воздействие) .....	223
15.1.2. Единичный импульс ( $\delta$ -функция, функция Дирака) .....	225
15.1.3. Связь между единичным скачком и единичным импульсом.....	228
15.1.4. Отрезок гармонического колебания.....	228
15.2. Описание процессов с помощью интегро-дифференциальных уравнений. Начальные условия .....	229
15.3. Импульсная характеристика. Интеграл свёртки .....	231
15.4. Переходная характеристика. Интеграл Дюамеля .....	233
<b>Лекция 16. Описание линейных электрических цепей в операторной <math>p</math>-области .....</b>	<b>236</b>
16.1. Преобразование Лапласа и его свойства .....	236
16.1.1. Определение преобразования Лапласа .....	236
16.1.2. Основные свойства преобразования Лапласа.....	238
16.2. $L$ -изображения типовых функций, операций дифференцирования и интегрирования .....	241
16.2.1. $L$ -изображения типовых функций.....	241
16.2.2. $L$ -изображения операций дифференцирования и интегрирования .....	245
16.3. Обратное преобразование Лапласа .....	247



<b>Лекция 17. Операторные передаточные функции .....</b>	<b>253</b>
17.1. Законы Ома и Кирхгофа в операторной форме .....	253
17.1.1. Законы Кирхгофа в операторной форме .....	253
17.1.2. Операторные сопротивления и проводимости элементов электрических цепей .....	254
17.1.3. Операторные сопротивление и проводимость последовательного и параллельного двухполюсников .....	255
17.1.3. Операторные сопротивление и проводимость двухполюсника общего вида .....	257
17.2. Определение операторной передаточной функции. Связь с импульсной и переходной характеристиками .....	258
17.3. Понятие о нулях и полюсах передаточной функции. Устойчивость передаточной функции .....	261
17.4. Связь передаточной функции с частотными и временными характеристиками цепи .....	266
<b>Лекция 18. Свободные колебания в пассивных     электрических цепях .....</b>	<b>269</b>
18.1. Свободные колебания в электрических цепях с одним реактивным элементом .....	270
18.1.1. Свободные колебания в простейшей $RC$ -цепи .....	270
18.1.2. Свободные колебания в простейшей $RL$ -цепи .....	274
18.2. Переходные колебания в цепях с одним реактивным элементом.....	276
<b>Лекция 19. Переходные процессы в колебательных контурах .....</b>	<b>282</b>
19.1. Свободные колебания в $RC$ -цепи при воздействии видеоимпульса.....	283
19.2. Свободные колебания в параллельном контуре без потерь .....	286
19.3. Свободные колебания в последовательном $RLC$ -контуре .....	289
19.4. Колебания в последовательном $RLC$ -контуре при воздействии в виде отрезка гармонического колебания .....	295
19.5. Прохождение радиоимпульса через колебательный контур .....	298
<b>Глава 6. Основы теории линейных четырёхполюсников .....</b>	<b>301</b>
<b>Лекция 20. Системы собственных параметров     четырёхполюсников .....</b>	<b>303</b>
20.1. Определение и классификация четырёхполюсников .....	303
20.2. Уравнения передачи четырёхполюсника .....	307
20.3. Системы собственных параметров и их физический смысл .....	310

20.4. Методы определения собственных параметров. Соотношения между различными системами параметров.....	314
20.4.1. Методы определения собственных параметров.....	314
20.4.2. Соотношения между различными системами параметров.....	315
20.4.3. Свойства параметров ХХ и КЗ пассивного четырёхполюсника.....	319
<b>Лекция 21. Собственные параметры четырёхполюсников.....</b>	<b>321</b>
21.1. Собственные параметры типовых четырёхполюсников.....	321
21.1.1. Собственные параметры элементарных четырёхполюсников.....	321
21.2. Собственные параметры простейших четырёхполюсников.....	323
21.2.1. Собственные параметры симметричного мостового четырёхполюсника.....	327
21.3. Эквивалентность Т-, П-образного и мостового четырёхполюсников.....	329
21.4. Соединения четырёхполюсников.....	331
21.4.1. Каскадное соединение четырёхполюсников.....	332
21.4.2. Параллельное соединение четырёхполюсников.....	333
21.4.3. Последовательное соединение четырёхполюсников.....	334
21.4.4. Последовательно-параллельное соединение четырёхполюсников.....	335
21.4.5. Параллельно-последовательное соединение четырёхполюсников.....	336
21.5. Условия регулярности соединения.....	336
<b>Лекция 22. Внешние характеристики четырёхполюсников.....</b>	<b>338</b>
22.1. Комплексное входное сопротивление четырёхполюсника при произвольной нагрузке.....	339
22.2. Комплексные частотные характеристики нагруженных четырёхполюсников.....	341
22.2.1. Комплексные частотные характеристики односторонне нагруженных четырёхполюсников.....	341
22.2.2. Внешние характеристики двусторонне нагруженного четырёхполюсника.....	344
22.3. Нормирование рабочих характеристик.....	346
22.3.1. Комплексный нормированный рабочий коэффициент передачи.....	346
22.3.2. Рабочая постоянная передачи цепи.....	348
<b>Глава 7. Цепи с распределёнными параметрами.....</b>	<b>351</b>
<b>Лекция 23. Первичные параметры длинной линии.....</b>	<b>353</b>
23.1. Понятие длинной линии.....	353
23.1.1. Определение длинной линии.....	353

23.1.2. Классификация длинных линий .....	356
23.2. Первичные параметры длинной линии.....	359
23.3. Уравнения передачи длинной линии .....	362
23.4. Классификация кабелей согласно международному стандарту.....	366
<b>Лекция 24. Волновые параметры длинной линии .....</b>	<b>370</b>
24.1. Падающие и отражённые волны .....	370
24.2. Соотношения между комплексными амплитудами падающих и отражённых волн .....	375
24.2.1. Волновое сопротивление .....	376
24.2.2. Коэффициент отражения .....	377
24.3. Уравнения передачи согласованно нагруженной длинной линии.....	379
24.4. Постоянная передачи и частотные характеристики длинной линии ....	381
24.4.1. Постоянная передачи длинной линии .....	381
24.4.2. Частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) согласованно нагруженной длинной линии .....	384
24.5. Входное сопротивление длинной линии .....	385
24.6. Определение параметров линии методом холостого хода и короткого замыкания.....	387
<b>Лекция 25. Колебания в линиях без потерь.....</b>	<b>390</b>
25.1. Длинные линии с пренебрежимо малыми потерями.....	390
25.1.1. Вторичные параметры и уравнения передачи длинной линии без потерь .....	391
25.1.2. Режим бегущей волны (согласованной нагрузки) в линии без потерь .....	393
25.2. Режим стоячих волн.....	394
25.3. Режим смешанных волн .....	399
25.4. Входное сопротивление линии без потерь .....	401
25.4.1. Режим короткого замыкания линии .....	402
25.4.2. Режим холостого хода линии.....	404
25.4.3. Входное сопротивление линии с произвольной нагрузкой .....	405
25.5. Примеры применения длинных линий с пренебрежимо малыми потерями.....	407
25.5.1. Металлический изолятор.....	407
25.5.2. Колебательный контур .....	408
25.5.3. Линейный вольтметр.....	409
25.5.4. Трансформатор сопротивлений .....	410

<b>Глава 8. Функции электрических цепей. Критерии устойчивости .....</b>	<b>413</b>
<b>Лекция 26. Свойства функций электрических цепей.....</b>	<b>415</b>
26.1. Свойства передаточной функции .....	415
26.2. Свойства частотных характеристик .....	423
<b>Лекция 27. Критерии устойчивости.....</b>	<b>427</b>
27.1. Критерий устойчивости Гурвица .....	428
27.1.1. Свойства полиномов Гурвица .....	429
27.2. Критерий устойчивости Михайлова .....	435
<b>ЧАСТЬ II. ОСНОВЫ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....</b>	<b>437</b>
<b>Глава 9. Математические основы синтеза электрических цепей с заданными свойствами .....</b>	<b>439</b>
<b>Лекция 28. Задача синтеза электрических цепей и этапы её решения .....</b>	<b>441</b>
28.1. Постановка задачи оптимального синтеза электрической цепи .....	441
28.1.1. Условия физической реализуемости функций цепи .....	442
28.1.2. Характеристика задачи оптимального синтеза .....	444
28.2. Методы решения задачи синтеза электрических цепей.....	448
28.2.1. Метод оптимального параметрического синтеза.....	448
28.2.2. Классические методы синтеза электрических цепей.....	449
<b>Лекция 29. Оптимальные методы синтеза электрических цепей.....</b>	<b>455</b>
29.1. Наилучшее среднеквадратичное приближение (метрика $L^2$ ) .....	455
29.2. Наилучшее равномерное (чебышёвское) приближение (метрика $C$ ) ...	461
29.2.1. Постановка задачи наилучшего равномерного приближения .....	461
29.2.2. Обобщённая теорема Чебышёва об альтернансе .....	463
29.2.3. Понятие о полиномах Чебышёва .....	466
29.3. Полиномиальный алгоритм Ремеза.....	469
29.3.1. Понятие об алгоритме Ремеза .....	469
29.3.2. Пример использования обменного алгоритма Ремеза.....	471
29.4. Сопоставление результатов аппроксимации.....	475
29.5. Весовая функция .....	476
<b>Лекция 30. Реализация функций электрических цепей.....</b>	<b>480</b>
30.1. Положительные вещественные функции .....	480
30.1.1. Определение положительных вещественных функций (ПВФ) .....	481
30.1.2. Реактансные функции .....	483

30.2. Методы реализации пассивных двухполюсников (реактансных функций).....	487
30.2.1. Метод Фостера .....	487
30.2.2. Метод Кауэра.....	493
30.3. Канонические схемы реактивных двухполюсников .....	501
<b>Лекция 31. Методы реализации четырёхполюсников .....</b>	<b>502</b>
31.1. Характеристические параметры симметричного четырёхполюсника ....	502
31.2. Мостовая реализация.....	505
31.3. Реализация на основе Т- и П-образных симметричных схем.....	510
31.4. Лестничная реализация полиномиальных электрических цепей.....	513
31.5. Каскадно-согласованная реализация .....	519
31.6. Каскадно-развязанная реализация.....	521
31.7. Особенности математических моделей лестничных цепей.....	522
<b>Глава 10. Введение в синтез электрических фильтров .....</b>	<b>527</b>
<b>Лекция 32. Основные определения и классификация электрических фильтров.....</b>	<b>529</b>
32.1. Условия безыскажённой передачи сигналов через электрическую цепь.....	530
32.2. Классификация электрических фильтров.....	532
32.2.1. Определение фильтра .....	533
32.2.2. Амплитудно-частотные характеристики избирательных фильтров и требования к ним .....	535
<b>Лекция 33. Частотные преобразования в задачах синтеза электрических фильтров.....</b>	<b>541</b>
33.1. Задача синтеза фильтра .....	541
33.1.1. Понятия о нормировании частот и характеристик фильтра .....	541
33.1.2. Нормирование параметров элементов фильтра .....	543
33.2. Реактансные преобразования частоты.....	545
33.2.1. Преобразование НЧ ↔ НЧ-прототип .....	546
33.2.2. Преобразование ВЧ ↔ НЧ-прототип .....	546
33.2.3. Преобразование ПФ ↔ НЧ-прототип .....	547
33.2.4. Преобразование РФ ↔ НЧ-прототип .....	550
<b>Лекция 34. Аппроксимация АЧХ избирательных фильтров рациональными функциями .....</b>	<b>554</b>
34.1. Функция квадрата АЧХ.....	554
34.2. Синтез фильтров нижних частот.....	555
34.2.1. Фильтры Баттерворта .....	555

34.2.2. Фильтры Чебышёва.....	561
34.2.3. Фильтры Золотарёва—Кауэра (фильтры с изоекстремальными характеристиками затухания) .....	568
34.3. Некоторые сведения о функциях Якоби.....	570
<b>Лекция 35. Анализ схем фильтров .....</b>	<b>572</b>
35.1. Методика качественного анализа схем фильтров .....	572
35.1.1. Определение типа избирательности.....	572
35.1.2. Качественное построение АЧХ $A(\omega)$ и характеристики затухания $a(\omega)$ фильтра .....	575
35.1.3. Определение вида передаточной функции $H(\omega)$ фильтра.....	578
35.2. Влияние потерь на характеристики фильтра .....	581
35.2.1. Влияние потерь на передаточную функцию фильтра .....	581
35.2.2. Компенсация потерь методом предискажений по Дарлингтону.....	584
<b>Лекция 36. Кварцевые фильтры .....</b>	<b>586</b>
36.1. Параметры кварцевых резонаторов .....	586
36.1.1. Понятия о кварцевых резонаторах .....	586
36.1.2. Схема замещения и электрические параметры кварцевого резонатора.....	590
36.2. Принципы построения кварцевых фильтров .....	595
36.2.1. Дискретные кварцевые фильтры .....	595
36.2.2. Монолитные кварцевые фильтры.....	598
36.2.3. Фильтры на поверхностных акустических волнах .....	600
<b>Глава 11. Корректоры и регуляторы частотных характеристик .....</b>	<b>603</b>
<b>Лекция 37. Амплитудные корректоры.....</b>	<b>605</b>
37.1. Влияние частотных характеристик на прохождение сигнала в сложных электрических цепях .....	606
37.2. Решение задачи амплитудного корректирования.....	609
37.3. Основы реализации амплитудных корректоров .....	611
<b>Лекция 38. Фазовые корректоры .....</b>	<b>617</b>
38.1. Общие свойства фазовых звеньев .....	618
38.1.1. Частотные характеристики фазовых звеньев .....	618
38.1.2. Частотные характеристики простых фазовых звеньев.....	620
38.2. Синтез фазовых корректоров.....	623
38.2.1. Задание требований к фазовым корректорам.....	624
38.2.2. Схемы простых фазовых звеньев .....	625

<b>Лекция 39. Аналоговые линии задержки.....</b>	<b>630</b>
39.1. Определение и общие характеристики линий задержки .....	630
39.2. Синтез линий задержки .....	633
39.2.1. Постановка задачи синтеза линий задержки .....	635
39.2.2. Полиномиальные линии задержки .....	636
39.3. Понятие о фазовращателях .....	640
<b>Глава 12. Цепи с обратной связью .....</b>	<b>643</b>
<b>Лекция 40. Основные положения общей теории обратной связи .....</b>	<b>645</b>
40.1. Принцип обратной связи .....	645
40.2. Классификация систем с обратной связью.....	646
40.3. Передаточная функция цепи с обратной связью .....	650
40.4. Частотные и временные характеристики цепи с обратной связью.....	653
40.4.1. Частотные характеристики цепи с обратной связью .....	653
40.4.2. Импульсная характеристика цепи с обратной связью.....	655
40.4.3. Переходная характеристика цепи с обратной связью .....	658
<b>Лекция 41. Чувствительность и устойчивость цепей с обратной связью.....</b>	<b>660</b>
41.1. Чувствительность цепей с обратной связью .....	660
41.1.1. Определение чувствительности .....	661
41.1.2. Влияние обратной связи на чувствительность цепи .....	662
41.1.3. Фазовая чувствительность (нестабильность) прямой цепи .....	665
41.1.4. Ослабление нелинейных искажений .....	666
41.2. Устойчивость линейных систем с обратной связью .....	668
41.2.1. Устойчивость по Ляпунову .....	669
41.2.2. Критерий устойчивости Найквиста .....	671
<b>Лекция 42. Основы теории усилителей.....</b>	<b>679</b>
42.1. Основные характеристики усилителей.....	679
42.1.1. Частотные и энергетические характеристики усилителей.....	679
42.1.2. Нелинейные искажения в усилителях .....	683
42.2. Математические модели и схемы замещения усилителей.....	687
42.2.1. Математические модели усилителей .....	688
42.2.2. Однонаправленный (односторонний) усилитель .....	689
42.3. Усилители с обратной связью .....	692
42.3.1. Основные понятия и определения .....	693

42.3.2. Напряжение на входных зажимах зависимого источника .....	699
42.3.3. Комплексный коэффициент усилителя с ОС .....	700
42.3.4. Стабильность характеристик усилителя с ОС .....	703
42.3.5. Входное и выходное сопротивление усилителя с ОС .....	705
42.3.6. Устойчивость усилителя с ОС .....	708
<b>Лекция 43. Основы синтеза активных RC-цепей .....</b>	<b>710</b>
43.1. Операционные усилители .....	711
43.2. Простейший усилитель без инверсии входного сигнала (неинвертирующий).....	713
43.3. Усилитель с конечным коэффициентом усиления (масштабный усилитель).....	716
43.4. Повторитель напряжения.....	717
43.5. Простейший усилитель с инверсией входного сигнала (инвертирующий).....	718
43.5.1. Взвешивающий инвертор напряжения (инвертирующий усилитель) .....	720
43.5.2. Сумматор напряжения (инвертирующий) .....	720
43.5.3. Инвертирующий интегратор .....	721
43.5.4. Инвертирующий интегратор-сумматор .....	723
43.5.5. Инвертирующий дифференциатор .....	723
43.6. Конвертор отрицательного сопротивления.....	725
43.7. Инвертор сопротивления. Гиратор.....	727
<b>Дополнение.....</b>	<b>731</b>
<b>Лекция 44. Диплексоры и их применение .....</b>	<b>733</b>
44.1. Понятие о матрице рассеяния.....	734
44.2. Диплексоры-четырёхполосники.....	736
44.2.1. Применение диплексоров в усилителях.....	736
44.2.2. Применение диплексоров в преобразователях частоты.....	741
44.3. Диплексоры-шестиполосники .....	743
<b>Лекция 45. Введение в теорию волновых аналоговых фильтров.....</b>	<b>746</b>
45.1. Основные понятия о волновых аналоговых фильтрах.....	747
45.2. Моделирование отрезков длинных линий без потерь.....	752
45.3. Симметричные цепочечные звенья ВАФ .....	757
45.3.1. Условные обозначения звеньев и полузвеньев ВАФ.....	757
45.3.2. Свойства звена ВАФ-Ц с четвертьволновой связкой .....	759



---

45.3.3. Свойства звена ВАФ-Ц с полуволновой связкой .....	764
45.3.4. Моделирование симметричных цепочечных звеньев .....	767
45.3.5. Понятия о симметричных шлейфных звеньях волновых фильтров .....	773
45.4. Начала синтеза волновых аналоговых фильтров .....	776
45.4.1. Задание требований к волновому фильтру .....	777
45.4.2. Расчётные параметры фильтров на фазовых контурах .....	780
<b>Литература .....</b>	<b>783</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>785</b>

# Предисловие

Теоретические основы линейных электрических цепей, которые составляют предмет данной книги (учебного пособия), читаются в качестве базовой дисциплины в высших учебных заведениях студентам различных специальностей в областях телекоммуникации, радио- и электротехники согласно общеобразовательным стандартам в рамках общероссийских рабочих программ курсов "Основы теории цепей" и "Теоретические основы радиотехники".

Содержание книги тематически разделено на две части: *часть I* посвящена изучению общих свойств и методов анализа линейных электрических цепей и состоит из 27 лекций, объединённых в 8 глав; *часть II* посвящена синтезу линейных электрических цепей, включая расчёт цепей с распределёнными параметрами и оптимальный синтез фильтров, и состоит из 18 лекций, объединённых в 4 главы и дополнение. В *дополнении* рассматривается теория и практика диплексоров и впервые представлен в подобного рода учебных пособиях материал об основах современного синтеза волновых аналоговых фильтров.

Материал книги сопровождается большим количеством примеров анализа и синтеза электрических цепей. Все разделы и лекции построены по принципу тематической замкнутости благодаря включению в курс сведений из общей теории линейных систем и необходимого математического аппарата.

Лекционная композиция учебного пособия позволяет преподавателю легко формировать курс по теории линейных электрических цепей для двух- и трёх-семестровой подготовки согласно отводимому в вузе времени, принятой последовательности изложения и содержанию курса. При этом внимание акцентируется на чёткости современных определений ряда фундаментальных понятий теории цепей, благодаря чему достигается преемственность курсов теории линейных электрических цепей и цифровой обработки сигналов. Следует отметить, что курс цифровой обработки сигналов изучается следом за курсом теории линейных электрических цепей.

Учебное пособие может быть использовано для подготовки студентов всех форм обучения (бакалавров, специалистов, магистров), а также аспирантами, преподавателями вузов радиотехнических и телекоммуникационных профилей и инженерами для освоения методов анализа и синтеза электрических цепей.

Автор не считает, что ему удалось "покорить все вершины" и "преодолеть все тернии", которыми изобилует современная теория линейных электрических цепей, и благодарит всех, кто оказывал помощь и делился своим опытом на этом пути: прежде всего кандидата технических наук доцента В. Н. Гаврилова-Жукова, взявшего на себя труд скрупулёзного прочтения книги на этапе её написания, а также кандидатов технических наук доцентов: Л. А. Бабкову и В. А. Петракова, предложения и замечания которых были чрезвычайно полезными. Особая благодарность рецензентам: профессору Ю. А. Брюханову и профессору Е. Б. Соловьёвой, чьи замечания в большей части были учтены при доработке книги.

Разумеется, самую глубокую благодарность и признательность выражаю моей жене, Зайнаб Сабировне, за долготерпение и понимание, которые от неё потребовались за те два года, когда создавалась эта книга.

# Основные обозначения

$A$	фактор связи
$A(\omega),  H(j\omega) $	амплитудно-частотная характеристика
$\hat{A}(\omega)$	нормированная амплитудно-частотная характеристика
$a(\omega)$	ослабление
$b$	реактивная составляющая комплексной проводимости
$b(\omega)$	затухание
$C$	ёмкость
$d$	затухание контура (величина, обратная добротности)
$E, u_r$	электродвижущая сила, задающее напряжение источника напряжения
$E_d$	действующее значение электродвижущей силы
$E_m$	амплитуда гармонической электродвижущей силы
$\dot{E}, \dot{E}_{m0}$	комплексная амплитуда электродвижущей силы
$e, e(t)$	мгновенное значение электродвижущей силы
$F$	оператор, функция
$F(p)$	операторная функция
$f$	частота колебания (циклическая)
$G$	активная проводимость
$g$	активная составляющая комплексной проводимости
$g(t)$	переходная характеристика
$g_c$	характеристическая постоянная передачи четырехполюсника
$H(p)$	передаточная функция
$H(j\omega)$	комплексная частотная характеристика

$H_i(p)$	передаточная функция (передаточный коэффициент) по току
$H_u(p)$	передаточная функция (передаточный коэффициент) по напряжению
$H_Z(p)$	операторное передаточное сопротивление
$H_Y(p)$	операторная передаточная проводимость
$H_z(p)$	передаточная функция относительно элемента "э"
$h(t)$	импульсная характеристика
$I_m$	амплитуда гармонического тока
$\dot{I}, \dot{I}_m$	комплексная амплитуда тока
$I_d$	действующее значение тока
$\text{Im}(a + jb)$	$b$ — мнимая часть комплексного числа
$K_{бв}$	коэффициент бегущей волны
$k$	коэффициент связи, модуль функций Якоби
$j$	мнимая единица
$L$	индуктивность
$L\{f(t)\}$	оператор прямого преобразования Лапласа, или $L$ -преобразование
$L^{-1}$	оператор обратного преобразования Лапласа, обратное $L$ -преобразование
$M$	взаимная индуктивность
$P$	полная (кажущаяся) мощность
$P_{ср}$	средняя (активная) мощность
$P_p$	реактивная мощность
$\dot{P}$	комплексная мощность
$P_n(x), P_n(\Omega)$	полином Чебышёва степени $n$
$p$	коэффициент отражения
$p(t)$	мгновенная мощность
$p = \zeta + j\omega$	комплексная переменная, оператор Лапласа
$p_{0i}$	$i$ -ый нуль передаточной функции
$p_{*k}$	$k$ -ый полюс передаточной функции
$Q$	добротность
$R$	активное сопротивление

$\operatorname{Re}(a + jb)$	$a$ — вещественная часть комплексного числа
$r$	активная составляющая комплексного сопротивления
$T$	период колебания
$t$	время
$t_r, t_{гвз}$	групповое время (задерживания, прохождения)
$U_d$	действующее значение напряжения
$U_m$	амплитуда гармонического напряжения
$\dot{U}, \dot{U}_m$	комплексная амплитуда напряжения
$\dot{U}_d$	действующая комплексная амплитуда напряжения
$u, u(t)$	мгновенное значение напряжения
$v_r$	групповая скорость
$v_\phi$	скорость распространения (фазовая скорость)
$v(p)$	полином Гурвица
$v(j\omega)$	комплекс полинома Гурвица
$\dot{X}_m$	комплексная амплитуда, символическое изображение гармонического колебания
$x$	реактивная составляющая комплексного сопротивления
$x(t)$	воздействие на цепь
$Y(p)$	операторная проводимость
$Y(j\omega), Y$	комплексная проводимость, комплекс полной проводимости, функция входной проводимости, адмитанс
$ Y(j\omega) , y$	полная проводимость
$y(t)$	реакция цепи
$Z_B$	волновое сопротивление длиной линии
$Z(p)$	операторное сопротивление
$Z(j\omega), Z$	комплексное сопротивление, комплекс полного сопротивления, функция входного сопротивления, импеданс
$ Z(j\omega) , z$	полное сопротивление
$Z_c(j\omega), Z_c$	характеристическое сопротивление четырехполюсника
$\alpha$	коэффициент затухания длиной линии
$\beta$	коэффициент фазы длиной линии
$\gamma$	коэффициент распространения длиной линии

---

$\Delta$	неравномерность в полосе пропускания
$\Delta\omega$	абсолютная расстройка
$\delta$	коэффициент затухания контура
$\delta_1$	максимально допустимое отклонение амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания
$\delta_2$	максимально допустимое отклонение амплитудно-частотной характеристики в полосе задерживания
$\delta(t)$	$\delta$ -функция, функция Дирака
$\eta$	коэффициент полезного действия, нормированная частота НЧ-прототипа
$\lambda$	длина волны
$\nu$	относительная расстройка
$\xi$	обобщённая расстройка
$\varepsilon(j\omega)$	комплексная относительная погрешность
$\rho$	волновое (характеристическое) сопротивление линии, контура
$\tau$	постоянная времени цепи с одним реактивным элементом
$\varphi(\eta)$	функция фильтрации
$\varphi(\omega)$	фазочастотная характеристика
$\varphi_0$	начальная фаза
$\Omega$	ширина полосы пропускания, нормированная частота
$\omega$	круговая частота
$\omega_0$	резонансная частота
$1(t)$	единичный скачок (ступенчатое воздействие, перепад), функция Хэвисайда

# Принятые сокращения

АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
ВАФ	волновой аналоговый фильтр
ВАФ-Ц	цепочечные звенья и фильтры ВАФ
ВАФ-Ш	шлейфные звенья и фильтры ВАФ
ВАХ	вольт-амперная характеристика
ГВЗ	групповое время задержки
ЗНК	закон напряжений Кирхгофа
ЗТК	закон токов Кирхгофа
ИНУН	источник напряжения, управляемый напряжением
ИНУТ	источник напряжения, управляемый током
ИТУН	источник тока, управляемый напряжением
ИТУТ	источник тока, управляемый током
КЗ	короткое замыкание
КОС	конвертор отрицательного сопротивления
КПД	коэффициент полезного действия
КЧХ	комплексная частотная характеристика
ЛАХ	логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
ЛЗ	линия задержки
ОдУ	однонаправленный усилитель
ОС	обратная связь
ОУ	операционный усилитель
ПАВ	поверхностные акустические волны
ПВФ	положительная вещественная функция



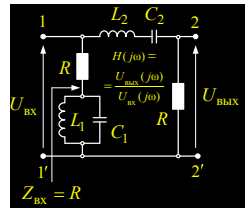
---

ПерП	переходная полоса
ПЗ	полоса задерживания
ПЗФ	полосно-заграждающий фильтр
ПП	полоса пропускания
ПФ	полосовой фильтр
РФ	режекторный фильтр
СВЧ	сверхвысокие частоты
СКО	среднеквадратичное отклонение
ТЛЭЦ	теория линейных электрических цепей
УСР	условия схемной реализуемости
УФР	условия физической реализуемости
ФВЧ	фильтр высоких частот
ФК	фазовый корректор
ФК1	фазовый контур 1-го порядка
ФНЧ	фильтр низких частот
ФРП	фильтр с распределёнными параметрами
ФСЭ	фильтр на сосредоточенных элементах
ФФК	фильтр на фазовых контурах
ФЧХ	фазочастотная характеристика
ХХ	холостой ход
ЭДС	электродвижущая сила
ЭЦ	электрическая цепь

# **ЧАСТЬ I**

## **ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

# Лекция 1



## Основные определения и понятия теории электрических цепей

### 1.1. Предмет дисциплины

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Электрической цепью называют любую совокупность радиотехнических (электротехнических) устройств, соединённых электрическими проводниками.

Электромагнитное состояние большинства электрических цепей характеризуют с помощью понятий "электрический ток" и "электрическое напряжение", или кратко токов  $i$  и напряжений  $u$ . Они являются функциями времени  $t$ , а в некоторых цепях могут быть и функциями пространственных координат (например, в длинных линиях).

Значения токов и напряжений в определённый момент времени  $t$  обозначаются

$$i = i(t) \quad \text{и} \quad u = u(t)$$

соответственно и называются мгновенными. Эти значения в определённый момент времени  $t$  полностью характеризуют электромагнитное состояние электрической цепи и все её свойства. Токи и напряжения в электрической цепи могут быть найдены как непосредственным их измерением с помощью амперметров и вольтметров, так и с помощью расчётов. Непосредственное измерение можно осуществить, во-первых, только в реально действующей цепи и, во-вторых, если цепь или требуемый её участок доступен. Но в теории и на практике чаще всего значения токов и напряжений в цепи требуется рассчитать, для чего составляются специальные уравнения.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Уравнения, в результате решения которых могут быть найдены токи и напряжения в цепи, называются *уравнениями электромагнитного состояния* (уравнениями состояния).

Уравнения состояния часто называют *операторами*, которые принято обозначать буквой  $F$ . По этой причине в дальнейшем мы будем пользоваться этими терминами как синонимами. Оператор позволяет произвести *анализ* всех характеристик цепи; с другой стороны, для создания цепи, обладающей желаемыми свойствами, необходимо получить оператор  $F$ , т. е. провести *синтез* цепи. Любое уравнение состояния представляет собой математическую модель цепи, приближённо отображающую реальные физические свойства цепи, но не передаёт содержание внутренних процессов.

Электрические проводники и устройства, составляющие цепь, при их математическом описании представляются идеальными, хотя в действительности таковыми не являются. Идеальные проводники и устройства (приборы), обладающие лишь каким-либо одним свойством, называются *элементами электрических цепей*.

Элементы электрических цепей разделяют на пассивные и активные. К *пассивным элементам* относятся: резистивный элемент (идеальный резистор, элемент активного сопротивления), элемент индуктивности (индуктивность), элемент ёмкости (ёмкость).

*Активными элементами* электрической цепи являются идеальные источники электрической энергии: идеальные источники тока и идеальные источники напряжения.

Графическое изображение соединений и элементов электрических цепей называют *электрической схемой цепи*.

Таким образом, предметом дисциплины "Основы теории цепей" является изучение свойств электрических цепей разнообразной природы и синтез цепей с заданными характеристиками (свойствами).

## 1.2. Напряжения и токи в электрических цепях

Электрический ток (рис. 1.1, *a*), протекающий по цепи, представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Мерой тока является его сила (измеряется в амперах — А), т. е. отношение количества электрического заряда  $q$  (измеряется в кулонах — Кл), прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt},$$

откуда

$$A = \frac{\text{Кл}}{c}.$$

Напряжением  $u$  (измеряется в вольтах — В) называется количество энергии  $W$  (измеряется в джоулях — Дж), затрачиваемое на перемещение единицы заряда  $q$  [Кл] из одной точки пространства в другую

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta q} = \frac{dW}{dq} \Rightarrow \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

Для широкого класса электрических цепей напряжение удобно определять как разность потенциалов  $\Phi_m$  и  $\Phi_n$  между  $m$ -ым и  $n$ -ым зажимами электрической цепи (рис. 1.1, б) соответственно

$$u_{mn} = \Phi_m - \Phi_n,$$

причём под потенциалом зажима понимают количество энергии, затрачиваемое на перемещение единицы заряда из рассматриваемого зажима в бесконечно удалённую точку пространства  $\infty$ , потенциал которой считается равным нулю  $\Phi_\infty = 0$ .

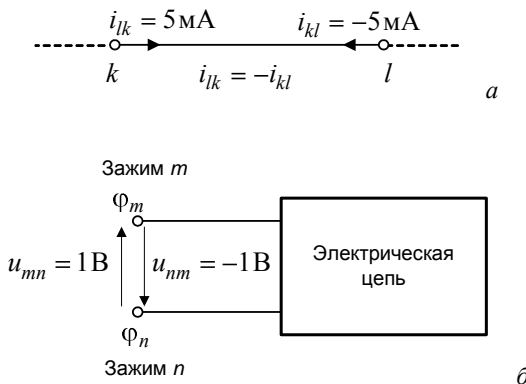


Рис. 1.1. Токи (а) и напряжения (б) в электрических цепях

При исследованиях и расчётах электрических цепей *необходимо знать* не только абсолютные величины токов и напряжений, но и *направления их отсчёта*, которые указываются стрелками. По традиции конец стрелки указывает:

□ **для тока** — предполагаемое или известное направление движения положительных зарядов, а противоположное направление — движение отрицательных зарядов; изменение направления отсчёта приводит к изменению знака тока (рис. 1.1, а). Смысл выбора направления отсчёта покажем на примере: пусть при выбранном направлении от узла  $k$  в сторону узла  $l$

получена величина  $i_{lk} = 5 \text{ mA}$ ; этот результат необходимо прочесть так: ток в проводнике имеет величину 5 мА и течёт от узла  $k$  в сторону узла  $l$ ; если же выбрано направление от узла  $l$  в сторону узла  $k$ , получим  $i_{lk} = -5 \text{ mA}$ ; этот результат, как и в предыдущем случае, вновь показывает, что ток имеет величину 5 мА и течёт от узла  $k$  в сторону узла  $l$ ;

□ **для напряжения** — предполагаемую или известную точку (зажим) высшего потенциала; изменение направления отсчёта напряжения состоит в изменении знака (рис. 1.1, б), а именно:

$$u_{mn} = \Phi_m - \Phi_n,$$

$$u_{nm} = \Phi_n - \Phi_m = -u_{mn}.$$

При этом значения напряжения  $u_{mn} = 1 \text{ В}$  и  $u_{nm} = -1 \text{ В}$  приводят к одному и тому же результату, а именно: напряжение между зажимами равно 1 В, причём потенциал зажима  $m$  выше потенциала зажима  $n$ .

Выбор направлений токов и напряжений, вообще говоря, является произвольным, но именно с этого необходимо начинать решение любой задачи.

### ЗАМЕЧАНИЕ

Включение измерительных приборов (вольтметров, амперметров, осциллографов и др.), реагирующих на изменение направления измеряемой величины, что на зажимах указывается знаками "+" или "-", следует производить с учётом положительных направлений измеряемых величин (рис. 1.2).

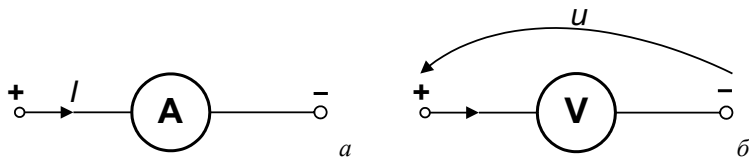


Рис. 1.2. Подключение амперметра (а) и вольтметра (б)

Изменения во времени токов и напряжений в электрических цепях называются *колебаниями* соответствующих величин. Колебания, являющиеся носителями информации, называют *электрическими сигналами*, или просто *сигналами*. Колебания, а также сигналы безотносительно их природы принято обозначать  $x(t)$  или  $y(t)$ . Это означает, что  $x(t)$  и  $y(t)$  могут иметь смысл как тока, так и напряжения.