



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, РАДИОТЕХНИКИ
И ЭЛЕКТРОНИКИ (МИРЭА, МГУПИ)

С. А. Миленина

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

Под редакцией **Н. К. Миленина**

*Рекомендовано Учебно–методическим отделом высшего образования
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по инженерно–техническим
направлениям и специальностям*

Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru

Москва ■ Юрайт ■ 2015

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.2я73

М60

Автор:

Миленина Светлана Александровна — Миленина Светлана Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и электротехники факультета информационных технологий Московского государственного университета информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА, МГУПИ).

Ответственный редактор:

Миленин Николай Кириллович — кандидат технических наук, доцент, почетный радист России.

Рецензенты:

Николаев С. С. — доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана;

Одинокое В. Ф. — доктор технических наук, профессор Рязанского государственного радиотехнического университета.

Миленина, С. А.

М60 Электротехника, электроника и схемотехника : учебник и практикум для академического бакалавриата / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. — М. : Издательство Юрайт, 2015. — 399 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-9916-5307-7

В учебнике рассмотрены основные методы расчета установившихся и переходных процессов в электрических цепях, а также их приложения к наиболее распространенным в инженерной практике электронным схемам, включая различного рода усилители, повторители, генераторы гармонических и релаксационных колебаний, триггеры, пассивные и активные фильтры, стабилизаторы и т.п.

Большое внимание уделено свойствам и характеристикам полупроводниковых элементов: диодов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, операционных усилителей, приборов с зарядовой связью, простейших логических элементов и универсальных базисов, а также их схемной реализации. Отдельные главы посвящены схемотехнике цифровых устройств, не содержащих памяти, включая АЦП и ЦАП, и цифровых устройств с «памятью». Рассмотрены основные принципы построения программируемых логических устройств и микропроцессоров. Обозначены наиболее перспективные направления развития электронной базы, в том числе на основе СБИС с объемными МОП-транзисторами.

В конце каждой главы учебника содержатся контрольные вопросы и задания. Их цель — направить студента по наиболее рациональному пути при освоении материала учебника.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям.

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.2я73

Оглавление

Предисловие.....	13
------------------	----

Раздел I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Глава 1. Понятие электрической цепи и ее основные законы.....	17
1.1. Электрическая цепь и ее элементы	17
1.2. Пассивные элементы электрической цепи	18
1.2.1. Резистор как элемент электрической цепи. Основные соотношения. Установившийся синусоидальный режим в линейном резисторе	18
1.2.2. Индуктивность как элемент электрической цепи. Основные соотношения. Особенности стационарного и установившегося синусоидального режимов в индуктивности.....	19
1.2.3. Емкость как элемент электрической цепи. Основные соотношения. Особенности стационарного и установившегося синусоидального режимов в емкости	20
1.3. Активные элементы электрической цепи	22
1.3.1. Источник электродвижущей силы.....	22
1.3.2. Источник тока.....	23
1.4. Реальный источник и его внешняя характеристика	23
1.4.1. Простейшие схемы замещения реального источника	25
1.4.2. Понятие внутреннего сопротивления реального источника. Внутренние сопротивления идеальных источников ЭДС и тока.....	25
1.5. Напряжение на участке цепи. Обобщенный закон Ома.....	26
1.6. Топологические элементы электрической цепи.....	27
1.7. Законы Кирхгофа	27
1.7.1. Первый закон Кирхгофа	28
1.7.2. Второй закон Кирхгофа.....	28
1.7.3. Общий вид системы уравнений Кирхгофа. Классификация задач анализа электрических цепей.....	29
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>30</i>

Глава 2. Методы расчета стационарных режимов в линейных электрических цепях	32
2.1. Особенности уравнений Кирхгофа для стационарного режима	32
2.2. Метод контурных токов	33
2.3. Метод узловых потенциалов	34
2.3.1. Общая характеристика метода. Уравнения цепи относительно потенциалов узлов.....	34
2.3.2. Понятие проводимости ветви	35
2.3.3. Правила записи системы уравнений относительно узловых потенциалов по виду схемы	36
2.4. Понятие входного сопротивления пассивного двухполюсника и его простейшая схема замещения.....	36

2.5. Простейшие схемы замещения активного двухполюсника в стационарном режиме	37
2.5.1. Понятие входного сопротивления активного двухполюсника	37
2.5.2. Теорема об активном двухполюснике (эквивалентном генераторе). Виды простейшей схемы замещения активного двухполюсника	38
2.6. Метод эквивалентного генератора	38
2.7. Методика расчета режима в нелинейной резистивной нагрузке линейного активного двухполюсника	40
2.8. Условие передачи наибольшей мощности от активного двухполюсника к пассивному в стационарном режиме.....	41
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	43

Глава 3. Цепи переменного периодического тока44

3.1. Основные понятия и характеристики цепей переменного периодического тока.....	44
3.2. Действующее (эффективное) значение переменного тока.....	45
3.2.1. Связь между действующим и мгновенным значениями переменного тока.....	45
3.2.2. Связь между действующим значением синусоидального тока и его амплитудным значением	46
3.2.3. Понятия действующих значений напряжения и ЭДС.....	46
3.2.4. Основные измерительные приборы и их учет в расчетных схемах	46
3.3. Условия возникновения и существования синусоидального режима в линейной цепи	47
3.4. Комплексная плоскость и некоторые ее свойства	48
3.5. Изображение синусоидальной функции времени на комплексной плоскости.....	48
3.5.1. Понятия комплексной амплитуды и комплекса действующего значения	48
3.5.2. Операции дифференцирования и интегрирования синусоидальных функций времени на комплексной плоскости	49
3.5.3. Связь между комплексами тока и напряжения в элементах R , L , C . Понятие комплексного сопротивления	50
3.6. Законы Кирхгофа для комплексов. Порядок расчета установившегося синусоидального режима символическим методом.....	51
3.7. Векторная диаграмма	55
3.8. Расчет периодического несинусоидального режима в линейной цепи.....	56
3.8.1. Идея метода и порядок расчета	56
3.8.2. Действующее значение периодического тока, представленного гармоническим рядом	57
3.9. Трехфазные цепи	58
3.9.1. Понятия трехфазного источника и трехфазной цепи	58
3.9.2. Варианты соединения фазных обмоток трехфазного генератора.....	59
3.9.3. Виды соединения нагрузок трехфазного генератора и основные структурные варианты трехфазной цепи.....	61
3.9.4. Особенности расчета симметричного режима в трехфазной цепи.....	64
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	65

Глава 4. Энергетические характеристики цепи синусоидального и периодического несинусоидального токов67

4.1. Мгновенная мощность	67
4.2. Активная мощность	69
4.3. Понятия полной и реактивной мощностей	71

4.4. Единицы измерения мгновенной, активной, полной и реактивной мощностей	72
4.5. Условие передачи наибольшей активной мощности от активного двухполюсника к пассивному в синусоидальном режиме.....	72
4.6. Активная мощность, потребляемая линейным пассивным двухполюсником в периодическом несинусоидальном режиме.....	76
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	77

Глава 5. Пассивный двухполюсник в цепи синусоидального тока. Резонансы ...79

5.1. Простейшие схемы замещения пассивного двухполюсника в синусоидальном режиме	79
5.2. Резонансное состояние пассивного двухполюсника.....	81
5.2.1. Резонанс напряжений	81
5.2.2. Резонанс токов.....	83
5.3. Резонанс напряжений в неразветвленном RLC-контуре	84
5.3.1. Основные соотношения при резонансе	84
5.3.2. Понятия характеристического сопротивления и добротности последовательного контура.....	86
5.3.3. Частотная характеристика $I(\omega)$ последовательного контура	86
5.3.4. Полоса пропускания.....	87
5.4. Резонанс токов в параллельном колебательном контуре.....	88
5.4.1. Основные соотношения при резонансе	88
5.4.2. Идеальный параллельный контур (без потерь)	90
5.4.3. Избирательные свойства параллельного колебательного контура	92
5.5. Сравнение избирательных свойств последовательного и параллельного колебательных контуров.....	93
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	94

Глава 6. Цепи с взаимной индукцией в установившемся синусоидальном режиме.....95

6.1. Параметры, характеризующие индуктивно связанные катушки	95
6.1.1. Понятие коэффициента взаимной индукции.....	95
6.1.2. Коэффициент связи	97
6.1.3. Понятие одноименных зажимов	98
6.2. Напряжение взаимной индукции	98
6.3. Учет напряжения взаимной индукции в уравнениях по второму закону Кирхгофа.....	99
6.4. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек в синусоидальном режиме.....	102
6.5. Линейный трансформатор в синусоидальном режиме.....	104
6.5.1. Основные уравнения линейного трансформатора при синусоидальном режиме и векторная диаграмма	105
6.5.2. Вносимое сопротивление	106
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	108

Глава 7. Основы теории линейных пассивных четырехполюсников в синусоидальном режиме111

7.1. Основные уравнения линейного пассивного четырехполюсника	112
7.2. Расчет коэффициентов основных уравнений линейного пассивного четырехполюсника.....	114
7.3. Простейшие схемы замещения линейного пассивного четырехполюсника	116
7.4. Понятие комплексного коэффициента передачи линейной системы.....	117

7.5. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики линейного пассивного четырехполюсника.....	118
7.6. Симметричный четырехполюсник и его характеристические параметры ...	120
7.6.1. Характеристическое сопротивление	120
7.6.2. Постоянная передачи.....	121
7.7. Понятие о частотных электрических фильтрах	122
7.7.1. Пассивные <i>LC</i> -фильтры	123
7.7.2. Пассивные <i>RC</i> -фильтры	124
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	125

Глава 8. Классический метод расчета переходных процессов в линейных электрических цепях	128
8.1. Законы коммутации	129
8.2. Независимые и зависимые начальные условия	129
8.3. Основные этапы классического метода расчета переходного процесса в линейной цепи.....	130
8.4. Особенности переходного процесса в цепях первого порядка	136
8.4.1. Вид свободной составляющей	136
8.4.2. Понятие постоянной времени.....	136
8.4.3. Приближенная оценка длительности переходного процесса в цепи первого порядка	137
8.5. Переходный процесс в неразветвленном <i>RLC</i> -контуре при подключении его к источнику постоянной ЭДС	137
8.5.1. Особенности характеристического уравнения цепи и его корней. Виды свободной составляющей	137
8.5.2. Аперiodический режим	138
8.5.3. Критический режим	140
8.5.4. Колебательный режим.....	141
8.6. Получение характеристического уравнения по комплексному входному сопротивлению цепи	142
8.7. Особенности переходных процессов в цепях второго порядка	144
8.7.1. Виды свободной составляющей	144
8.7.2. Рекомендации по расчету постоянных интегрирования	145
8.7.3. Оценка длительности переходного процесса в цепях второго порядка	145
8.8. Дифференцирующие и интегрирующие цепи	146
8.8.1. Дифференцирующее <i>RC</i> -звено.....	146
8.8.2. Интегрирующее <i>RC</i> -звено.....	147
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	148

Глава 9. Операторный метод расчета переходных процессов в линейных электрических цепях	151
9.1. Прямое и обратное преобразования Лапласа.....	151
9.2. Связь между изображениями тока и напряжения в элементах <i>R, L, C</i> . Их операторные схемы замещения	153
9.3. Законы Кирхгофа для изображений	155
9.4. Порядок расчета переходных процессов операторным методом	155
9.5. Теорема разложения.....	159
9.6. Операторный метод расчета переходных процессов в линейных пассивных цепях при произвольных (непериодических) воздействиях.....	162
9.6.1. Понятие передаточной функции пассивной цепи <i>K(p)</i> и рекомендации по ее нахождению	162

9.6.2. Основные этапы операторного метода расчета переходных процессов при произвольных внешних воздействиях	165
9.6.3. Рекомендации по определению изображения входного воздействия $X_{\text{вх}}(p)$. Применение теоремы запаздывания	165
9.6.4. Изображение ступенчатой функции	165
9.6.5. Изображение экспоненциального импульсодлительностью t_n	166
9.7. Связь передаточной функции $K(p)$ и комплексного коэффициента передачи $K(j\omega)$	168
9.8. Сравнение операторного метода расчета переходных процессов с классическим	169
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	169

Глава 10. Принцип наложения и его применение для расчета переходного процесса в цепи линейного пассивного двухполюсника при произвольных воздействиях на его входе

воздействиях на его входе	172
10.1. Постановка задачи и принципы подхода к ее решению	172
10.2. Ступенчатое представление импульсного входного воздействия	174
10.2.1. Понятие переходной характеристики цепи $h(t)$ (переходной функции)	174
10.2.2. Расчет реакции линейной цепи на ступенчатое воздействие	175
10.3. Применение интеграла Дюамеля при расчете реакции линейной цепи на непрерывное и кусочно-непрерывное воздействия	176
10.3.1. Расчет реакции линейной цепи на непрерывное воздействие	176
10.3.2. Расчет реакции линейной цепи на кусочно-непрерывное воздействие	179
10.4. Импульсная характеристика и ее применение для расчета переходных процессов при сложных воздействиях	180
10.4.1. Функция Дирака (δ -функция)	180
10.4.2. Понятие импульсной характеристики	181
10.4.3. Связь импульсной характеристики $h_0(t)$ с переходной функцией $h(t)$	182
10.4.4. Разновидность интеграла Дюамеля, содержащая импульсную характеристику	183
10.4.5. Изображения по Лапласу переходной $h(t)$ и импульсной $h_0(t)$ характеристик. Их связь с передаточной функцией $K(p)$	184
10.5. Спектральный метод расчета переходных процессов	185
10.5.1. Вещественная и комплексная формы ряда Фурье для периодической функции времени	185
10.5.2. Спектральное представление непериодического сигнала. Понятие спектральной плотности	186
10.5.3. Понятие амплитудного и фазового спектров сигнала	187
10.5.4. Связь преобразования Фурье с прямым преобразованием Лапласа	187
10.6. Связь между энергией непериодического сигнала и его спектром	190
10.6.1. Понятие энергии импульса	190
10.6.2. Равенство Парсеваля. Спектральная плотность энергии	190
10.6.3. Понятие ширины спектра	192
10.7. Связь между спектрами входного и выходного сигналов для линейной пассивной цепи	192
10.8. Порядок расчета переходных процессов спектральным методом	193
10.9. Сравнение спектрального и операторного методов расчета	195
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	196

Раздел II ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Глава 11. Полупроводниковые диоды	201
11.1. Основные свойства p - n -перехода и полупроводникового диода	201
11.2. Выпрямительные диоды	203
11.3. Стабилитроны	204
11.4. Варикапы	208
11.5. Фотодиоды, светодиоды, оптроны	209
11.6. Диоды Шоттки	211
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>212</i>
Глава 12. Биполярные и полевые транзисторы. Тиристоры	214
12.1. Принцип устройства и виды биполярных транзисторов	214
12.2. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора при включении по схеме с общим эмиттером	215
12.3. Полевые транзисторы. Общий принцип действия	217
12.4. Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом и их вольт-амперные характеристики	217
12.4.1. Семейство выходных характеристик	218
12.4.2. Стокозатворная (передаточная) характеристика	219
12.5. Полевые транзисторы с изолированным затвором	220
12.5.1. Полевые транзисторы со встроенным каналом	220
12.5.2. Полевые транзисторы с индуцированным каналом	221
12.6. Составные транзисторы. Схема Дарлингтона	222
12.7. Тиристоры. Структурные особенности и основные виды	223
12.7.1. Принцип действия динистора и его характеристики	223
12.7.2. Тринистор	225
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>226</i>
Глава 13. Электронные усилители	228
13.1. Главные рабочие параметры и характеристики усилителя	228
13.1.1. Понятия рабочей точки и ее окрестности	229
13.1.2. Понятие коэффициента усиления	229
13.1.3. Понятия входного и выходного сопротивлений усилителя	230
13.1.4. Частотная характеристика усилителя	230
13.2. Усилитель напряжения низкой частоты на биполярном транзисторе. Методика расчета основных параметров	231
13.2.1. Постановка задачи	231
13.2.2. Расчет режима в рабочей точке	233
13.2.3. Расчет коэффициента усиления по напряжению	234
13.2.4. Расчет входного и выходного сопротивлений усилителя	235
13.2.5. Способы задания рабочей точки (смещения)	235
13.2.6. Режимы «А», «В», «АВ»	237
13.2.7. Разделительные цепи	238
13.3. Повторитель напряжения на биполярном транзисторе — эмиттерный повторитель (схема с общим коллектором)	238
13.3.1. Коэффициент передачи по напряжению эмиттерного повторителя	239
13.3.2. Входное и выходное сопротивления повторителя	240
13.4. Усилители на полевых транзисторах	241
13.4.1. Методика расчета основных параметров усилителя низкой частоты на полевом транзисторе с управляющим p - n -переходом	241
13.4.2. Особенности задания рабочей точки	242

13.4.3. Определение положения рабочей точки на стокзатворной характеристике	243
13.4.4. Положение рабочей точки на семействе выходных характеристик	243
13.4.5. Расчет коэффициента усиления	244
13.4.6. Выходное сопротивление	244
13.5. Повторитель напряжения на полевом транзисторе (источковый повторитель). Методика расчета основных параметров	245
13.5.1. Определение рабочей точки на стокзатворной характеристике	246
13.5.2. Коэффициент передачи по напряжению	246
13.5.3. Выходное сопротивление	246
13.6. Усилители с обратной связью	247
13.6.1. Способы получения сигнала обратной связи	247
13.6.2. Способы введения сигнала обратной связи	248
13.6.3. Усилитель, охваченный последовательной отрицательной обратной связью по напряжению	248
13.6.4. Усилитель с большим коэффициентом усиления, охваченный отрицательной обратной связью по напряжению	249
13.6.5. Достоинства отрицательной обратной связи	249
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	249

Глава 14. Дифференциальный и операционный усилители251

14.1. Дифференциальный усилитель. Методика расчета основных параметров ..	251
14.1.1. Структурные особенности схемы дифференциального усилителя ..	251
14.1.2. Расчет базовой цепи в режиме покоя	252
14.1.3. Расчет коллекторной цепи в режиме покоя	253
14.1.4. Синфазная и дифференциальная составляющие входного сигнала ..	253
14.1.5. Реакция дифференциального усилителя на синфазное воздействие	254
14.1.6. Реакция дифференциального усилителя на дифференциальное воздействие	254
14.1.7. Коэффициент усиления для дифференциальной составляющей входного сигнала	255
14.1.8. Входное и выходное сопротивления для дифференциальной составляющей входного сигнала	255
14.1.9. Инвертирующий и неинвертирующий входы дифференциального усилителя	256
14.2. Основные свойства операционного усилителя	256
14.2.1. Условное обозначение операционного усилителя	256
14.2.2. Особенности передаточной характеристики реального операционного усилителя	257
14.2.3. Взаимодействие операционного усилителя с внешней цепью	258
14.3. Методы расчета цепей, содержащих операционный усилитель	259
14.4. Расчет по мгновенным значениям	260
14.4.1. Инвертирующий и неинвертирующий источники напряжения, управляемые напряжением	260
14.4.2. Повторитель напряжения	261
14.4.3. Схема дифференцирования	261
14.4.4. Схема интегрирования	262
14.5. Операторный метод расчета переходного процесса в цепи с операционным усилителем	263
14.6. Применение символического метода	264
14.7. Активные фильтры	266
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	267

Глава 15. Электронные генераторы. Автогенераторы гармонических колебаний	269
15.1. Электронные генераторы	269
15.1.1. Классификация электронных генераторов	269
15.2. Структура автогенератора гармонических колебаний	270
15.3. Условие существования установившихся колебаний	270
15.4. LC-автогенератор	271
15.4.1. Процесс установления колебаний	271
15.4.2. Расчет амплитуды автоколебаний	272
15.5. RC-автогенератор	274
15.5.1. Основное требование к цепи обратной связи	274
15.5.2. Принцип работы RC-автогенератора	275
Контрольные вопросы и задания	277
Глава 16. Генераторы релаксационных колебаний	278
16.1. Генератор прямоугольных импульсов на операционном усилителе – мультивибратор	278
16.1.1. Структурные особенности схемы мультивибратора	279
16.1.2. Принцип работы	280
16.2. Ждущий мультивибратор (одновибратор)	282
16.3. Генератор пилообразного напряжения на операционном усилителе	283
16.4. Мультивибратор на биполярных транзисторах	285
16.4.1. Главные особенности схемы мультивибратора	286
16.4.2. Неустойчивость стационарного режима	286
16.4.3. Квазистойчивый режим работы мультивибратора	288
16.5. Триггер	292
16.5.1. Статический режим	293
16.5.2. Режим «опрокидывания»	293
16.5.3. Простейшая запоминающая ячейка	294
Контрольные вопросы и задания	294
Глава 17. Источники вторичного электропитания	296
17.1. Источники первичного электропитания	296
17.2. Источники вторичного электропитания, их структура и назначение основных блоков	297
17.3. Выпрямители	298
17.3.1. Однофазные выпрямители	298
17.3.2. Трехфазный выпрямитель	300
17.3.3. Коэффициент пульсации	300
17.4. Сглаживающие фильтры	301
17.4.1. Пассивные сглаживающие фильтры	302
17.4.2. Активный сглаживающий фильтр на биполярном транзисторе	304
17.5. Стабилизаторы напряжения	306
17.5.1. Компенсационный стабилизатор напряжения линейного вида	306
17.5.2. Импульсный стабилизатор напряжения	308
Контрольные вопросы и задания	311
Глава 18. Логические основы цифровых электронных устройств	313
18.1. Цифровое устройство и его таблица истинности	313
18.2. Алгебраическая запись логической функции, выполняемой цифровым устройством	314
18.2.1. Простейшие логические операции и их алгебраическая запись	314
18.2.2. Основные законы и теоремы алгебры логики	315
18.2.3. Условное изображение устройств, реализующих простейшие логические действия, и их таблицы истинности	316

18.3. Две канонические формы алгебраической записи логической функции.....	317
18.3.1. Методика получения СДНФ	317
18.3.2. Методика получения СКНФ	317
18.4. Минимизация логических функций	319
18.4.1. Постановка задачи. Способы минимизации	319
18.4.2. Минимизация по формулам алгебры логики	320
18.5. Универсальные базисы «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ»	320
18.5.1. Операции «ИЛИ-НЕ», «И-НЕ»	321
18.5.2. Универсальность функций «ИЛИ-НЕ» и «И-НЕ»	321
18.6. Методика записи и структурной реализации логических функций в универсальных базисах «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ»	322
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	325
Глава 19. Схемная реализация логических функций	327
19.1. Ключевые схемы. Позитивная и негативная логики	327
19.2. Инвертор на биполярном транзисторе	328
19.3. Транзистор Шоттки	330
19.4. Особенности схемы простейшего инвертора на полевом транзисторе	331
19.5. Инвертор на комплементарных полевых транзисторах	331
19.6. Компараторы	333
19.7. Схемная реализация универсальных базисов «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ»	334
19.8. Диодно-транзисторная логика	335
19.9. Транзисторно-транзисторная логика	337
19.10. Универсальные базисы на КМОП-транзисторах (КМОП-логика)	339
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	341
Глава 20. Схемотехника цифровых устройств, не содержащих элементов памяти	343
20.1. Аналого-цифровые преобразователи	343
20.1.1. Дискретизация во времени	344
20.1.2. Квантование по уровню	344
20.1.3. Кодирование	345
20.1.4. Способы распознавания уровня преобразуемого сигнала внутри интервала дискретизации	345
20.1.5. Аналого-цифровые преобразователи последовательного счета	346
20.1.6. Аналого-цифровые преобразователи параллельного типа	348
20.2. Цифро-аналоговые преобразователи	348
20.2.1. Основные соотношения	348
20.2.2. Структурные составляющие цифро-аналогового преобразователя	349
20.2.3. Цифро-аналоговый преобразователь с двоично-взвешенной резистивной матрицей	350
20.2.4. Цифро-аналоговые преобразователи с матрицей $R - 2R$	351
20.3. Дешифраторы	352
20.4. Шифраторы	354
20.5. Мультиплексоры	356
20.6. Демультимплексоры	357
20.7. Одноразрядные двоичные сумматоры	358
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	361
Глава 21. Цифровые устройства с памятью	363
21.1. Триггеры	363
21.1.1. Асинхронные RS-триггеры	364
21.1.2. Синхронный RS-триггер	366

21.1.3. <i>D</i> -триггер.....	367
21.1.4. <i>T</i> -триггер (счетный) на основе <i>D</i> -триггера.....	368
21.1.5. Триггеры типа <i>M-S</i>	368
21.2. Счетчики и регистры	371
21.2.1. Счетчики	371
21.2.2. Регистры сдвига.....	373
21.3. Оперативные запоминающие устройства	375
21.3.1. Статические оперативные запоминающие устройства	375
21.3.2. Динамические оперативные запоминающие устройства	377
21.4. Постоянные запоминающие устройства.....	379
21.5. Программируемые логические устройства.....	380
21.5.1. Программируемые логические матрицы.....	380
21.5.2. Программируемые логические интегральные схемы и устройства	384
21.6. Микропроцессоры.....	386
21.7. Перспективные направления развития элементной базы сверхбольших интегральных схем.....	388
21.7.1. Повышение степени интеграции и снижение энергопотребления сверхбольших интегральных схем	388
21.7.2. Фотоэлектронные преобразователи «свет — сигнал» на основе приборов с зарядовой связью.....	390
21.7.3. Фотодиодные матрицы с координатной адресацией	393
21.7.4. Матричные преобразователи «сигнал — свет».....	395
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	395

Заключение	397
Литература	398

Предисловие

Учебник для бакалавров «Электротехника, электроника и схемотехника» относится к базовой части профессионального цикла дисциплин направления подготовки 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника». Он соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования уровня «Бакалавр. Академический курс» четвертого поколения.

В основу учебника положены материалы курсов лекций, читаемых автором в МГТУ «МИРЭА» по дисциплинам «Теоретические основы электротехники», «Электротехника и электроника» и «Электротехника, электроника и схемотехника», которая включена в учебный план подготовки бакалавров как базовый курс вместо первых двух дисциплин.

Учебник состоит из двух разделов.

Первый раздел («Электротехника») посвящен основам теоретической электротехники. В нем рассмотрены главные методы расчета установившихся и переходных процессов в электрических цепях. Теоретический материал сопровождается подробно решенными примерами.

Второй раздел («Электроника и схемотехника») подается с позиций теории линейных и нелинейных электрических цепей как продолжение и воплощение ее методов. Теоретическое изложение иллюстрируется практическими примерами по расчету наиболее важных для инженерной практики электронных схем и схемотехнических устройств, содержащих полупроводниковые диоды, стабилитроны, биполярные и полевые транзисторы. Рассмотрены такие схемотехнические устройства, как электронные и операционные усилители, электронные генераторы, триггеры, источники вторичного электропитания, базовые логические элементы, АЦП, ЦАП, ОЗУ, ПЗУ и другие функциональные узлы цифровой техники. Излагаются основные принципы построения программируемых пользователем логических матриц и устройств, в том числе СБИС программируемых логических интегральных схем и микропроцессоров.

Процесс преподавания курса «Электротехника, электроника и схемотехника» включает три вида аудиторных занятий: лекции, семинары и лабораторные работы. Именно на семинарах и в лаборатории, а также при выполнении специально разработанного комплекса домашних расчетных заданий, охватывающих важнейшие разделы курса, студентом приобретаются профессиональные навыки и умения. При этом лабораторные исследования могут проводиться не только на стендах с реальными элементами, но и на компьютерных моделях.

В результате освоения дисциплины студент должен:

знать

- основные законы и методы расчета и анализа электрических цепей в установившихся и переходных режимах;

- основные свойства и характеристики различных полупроводниковых элементов (приборов) и типовых схем с их использованием;
- принципы работы и параметры наиболее известных аналоговых и цифровых схемотехнических устройств;

уметь

- рассчитывать рабочие параметры аналоговых и цифровых устройств;
- ставить и решать схемотехнические задачи, связанные с выбором элементной базы при заданных требованиях к параметрам аналоговых и цифровых устройств (быстродействие, потребляемая мощность, надежность);

владеть

- практическими навыками применения основных законов электротехники и методов расчета электрических цепей к решению поставленных задач по проектированию схемотехнических устройств;
- методикой составления технических требований к схемотехническим устройствам.

Автор выражает глубочайшую благодарность Почетному радисту России, кандидату технических наук, доценту Николаю Кирилловичу Миленину, взявшему на себя не только нелегкий труд научного редактора рукописи учебника, но и всю предварительную работу при подготовке ее к изданию.

Автор благодарит рецензентов доктора технических наук, профессора МГТУ им. Н. Э. Баумана Сергея Сергеевича Николаева, доктора технических наук, профессора РГРУ Валерия Федоровича Одинокова, а также технического редактора Павла Александровича Макарова за внимательное прочтение рукописи, ценные советы и замечания.

Раздел I

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



Глава 1

ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- строгое определение и основные свойства пассивных и активных элементов расчетной модели реального электротехнического устройства;

- законы Кирхгофа;

уметь

- записывать в общем виде полную систему независимых уравнений Кирхгофа для заданной электрической схемы;

владеть

- навыками выбора правильной методики решения составленных уравнений в зависимости от вида поставленной задачи (расчет стационарного, синусоидального режимов и т.п.).

1.1. Электрическая цепь и ее элементы

Электрическая цепь — это расчетная модель реального электротехнического устройства. Она строится из элементов.

Элемент электрической цепи — идеализированный участок, где генерируется, запасается или преобразуется в другую форму электрическая энергия. Различают элементы пассивные и активные.

Элементы, в которых электрическая энергия запасается или необратимо преобразуется в другую форму, называются *пассивными*. Используемые в теории цепей пассивные элементы принято делить на три идеализированные группы: резисторы (сопротивления), индуктивности, емкости. Следует иметь в виду, что названные термины могут применяться для обозначения как самого пассивного элемента с определенными свойствами, так и величины параметра, характеризующего этот элемент.

Реальные элементы (катушки индуктивности, конденсаторы, потенциометры, реостаты и т.п.) проявляют в той или иной степени свойства, присущие идеальным пассивным элементам всех трех видов (резистивные, индуктивные, емкостные), что учитывается при построении их расчетных моделей.

Активные элементы являются генераторами электрической энергии. При построении электрических схем пользуются двумя видами идеальных активных элементов: источниками электродвижущей силы (ЭДС) и источниками тока.

Таким образом, цепная расчетная модель строится из пяти основных элементов: резистор, индуктивность, емкость, идеальный источник ЭДС, идеальный источник тока.

1.2. Пассивные элементы электрической цепи

1.2.1. Резистор как элемент электрической цепи. Основные соотношения.

Установившийся синусоидальный режим в линейном резисторе

Резистор (рис. 1.1) — элемент, в котором происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в тепловую (иногда — в механическую или химическую). Резистор — всегда потребитель энергии.

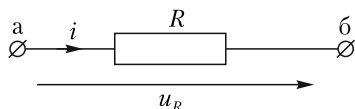


Рис. 1.1. Резистор — элемент, необратимо преобразующий электрическую энергию в тепловую

При выбранных на рис. 1.1 положительных направлениях ток и напряжение на резисторе связаны соотношением

$$u_R = u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = iR.$$

Здесь φ_a , φ_b — потенциалы точек «а» и «б»; R — сопротивление резистора.

Если величина $R = \text{const}$ (не зависит от протекающего тока либо приложенного напряжения), то резистор называется *линейным*. Для такого резистора при протекании через него переменного тока $i(t)$ напряжение по форме повторяет ток:

$$u_R(t) = Ri(t). \quad (1.1)$$

Например, когда ток в резисторе постоянен, напряжение также постоянно.

Рассмотрим важный для практики случай, когда ток в резисторе изменяется по периодическому закону (рис. 1.2)

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где I_m — амплитуда; $\omega t + \varphi$ — фаза; φ — начальная фаза (на рис. 1.2 $\varphi = 0$); $\omega = 2\pi/T$ — угловая частота; T — период синусоиды. Из формулы (1.1) следует, что

$$u_R = Ri(t) = RI_m \sin(\omega t + \varphi) = U_{mR} \sin(\omega t + \varphi).$$

Вывод. В установившемся синусоидальном режиме напряжение и ток в резисторе по фазе совпадают (одновременно проходят через ноль, одновременно достигают максимума), как показано на рис. 1.2. Амплитудные значения напряжения и тока в резисторе связаны соотношением $U_{mR} = RI_m$, которое можно считать законом Ома для амплитуд.

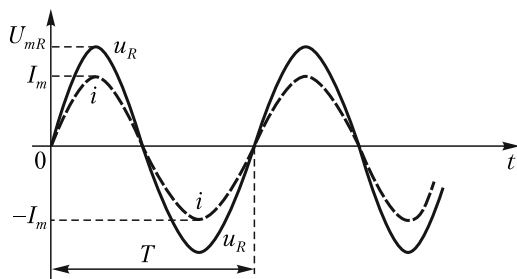


Рис. 1.2. В синусоидальном режиме напряжение и ток в резисторе совпадают по фазе

1.2.2. Индуктивность как элемент электрической цепи. Основные соотношения. Особенности стационарного и установившегося синусоидального режимов в индуктивности

Индуктивность (рис. 1.3) — элемент, запасаящий электрическую энергию в магнитном поле. Запасенная энергия при соответствующих условиях может быть полностью возвращена источнику. Идеальная индуктивность — только накопитель энергии, свойствами необратимого потребления энергии не обладает.

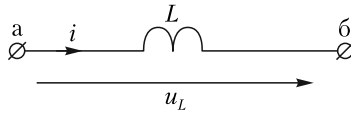


Рис. 1.3. Индуктивность — элемент, запасаящий энергию в магнитном поле

При выбранных на рис. 1.3 положительных направлениях напряжение и ток в индуктивности связаны соотношением

$$u_L = \varphi_a - \varphi_b = L \frac{di(t)}{dt},$$

т.е. разность потенциалов на индуктивном элементе пропорциональна скорости изменения тока во времени. Величина индуктивности L выступает как коэффициент пропорциональности между u_L и di/dt . Если $L = \text{const}$, т.е. не зависит от протекающего тока, индуктивность называется линейной.

Разность потенциалов на индуктивности возникает только в случае изменения тока во времени (когда $\frac{di}{dt} \neq 0$). Поэтому в стационарном режиме под действием постоянных источников, когда $i(t) = \text{const}$, индуктивность проявляет себя как проводник нулевого сопротивления, называемый короткозамкнутой перемычкой — к.з. (рис. 1.4).

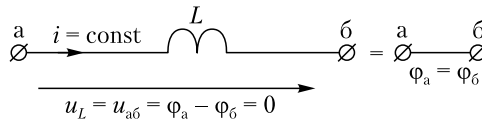


Рис. 1.4. В стационарном режиме ($i = \text{const}$) индуктивность проявляет себя как короткозамкнутая перемычка

Если в индуктивности протекает синусоидальный ток $i(t) = I_m \sin \omega t$, напряжение на индуктивности равно

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{mL} \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Вывод. Напряжение на индуктивности — гармоническая функция той же частоты, что и ток. Но фаза синусоидального напряжения на индуктивности превышает фазу тока на 90° . Кривая напряжения проходит через ноль на четверть периода раньше (рис. 1.5, а).

Амплитуды напряжения и тока в индуктивности связаны соотношением

$$U_{mL} = \omega L I_m,$$

его можно трактовать как закон Ома, причем роль сопротивления выполняет величина $X_L = \omega L$, называемая индуктивным сопротивлением. Индук-

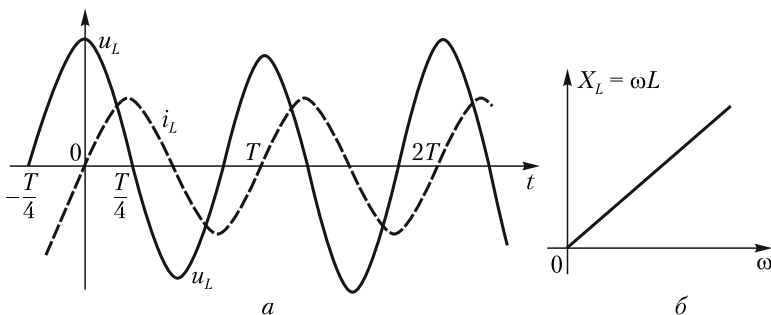


Рис. 1.5. Синусоидальный режим в индуктивности:

a — в синусоидальном режиме напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на 90° ;
б — индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ пропорционально частоте ω

тивное сопротивление зависит от частоты (рис. 1.5, б), а именно: при $\omega \rightarrow 0$ $X_L \rightarrow 0$, а при $\omega \rightarrow \infty$ $X_L \rightarrow \infty$. Поэтому в инженерной практике при качественном анализе схем на низких частотах ($\omega \rightarrow 0$) индуктивности закорачивают, а на высоких частотах ($\omega \rightarrow \infty$) — обрывают.

Реальная катушка обладает, наряду с индуктивными свойствами, резистивными потерями. Поэтому простейшая схема замещения реальной катушки содержит два идеальных элемента: индуктивность и резистор. Возможны как последовательная, так и параллельная схемы замещения катушки. На рис. 1.6 изображен последовательный вариант, включающий индуктивность L_Σ и резистор R_Σ .



Рис. 1.6. Простейшая схема замещения реальной катушки индуктивности

При синусоидальном режиме для характеристики соотношения между индуктивным ωL_Σ и резистивным R_Σ сопротивлениями катушки вводится понятие добротности

$$Q_L = \frac{\omega L_\Sigma}{R_\Sigma}.$$

Согласно определению Q_L — безразмерная величина, которая зависит от частоты. Для применяемых в инженерной практике высокодобротных катушек на частотах порядка $10 \cdot 10^6$ Гц (десятки мегагерц) добротность достигает нескольких сотен.

1.2.3. Емкость как элемент электрической цепи. Основные соотношения. Особенности стационарного и установившегося синусоидального режимов в емкости

Емкость (рис. 1.7) — элемент электрической цепи, запасаящий энергию в электрическом поле. Идеальная емкость только накапливает энергию и при определенных условиях может вернуть ее полностью.

При положительных направлениях, заданных на рис. 1.7, напряжение и ток в емкости связаны соотношением

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt,$$

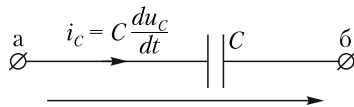


Рис. 1.7. Емкость — элемент, запасающий энергию в электрическом поле.
Ток в емкости протекает только при изменяющемся напряжении
(когда $du_c/dt \neq 0$)

где C — величина емкости (для линейного элемента $C = \text{const}$). Продифференцировав обе части последнего уравнения

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c(t),$$

получим выражение для тока в емкости через напряжение

$$i_c(t) = C \frac{du_c}{dt}.$$

Согласно последнему уравнению ток через конденсатор протекает только в случае переменного напряжения на конденсаторе, когда $du_c/dt \neq 0$.

Под действием постоянных источников устанавливается стационарный режим, когда токи в ветвях и напряжения на участках во времени неизменны. В этих условиях токи через конденсаторы не протекают, т.е.

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = 0,$$

что равносильно обрыву соответствующей ветви (рис. 1.8).

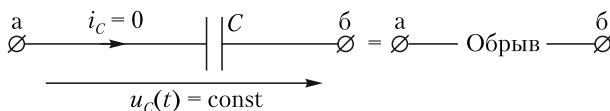


Рис. 1.8. В стационарном режиме ($u_c = \text{const}$) идеальная емкость проявляет себя как обрыв ветви

Если к обкладкам конденсатора емкостью C приложено переменное напряжение

$$u_c(t) = U_{mC} \sin \omega t,$$

в его цепи протекает ток

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_{mC} \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где $I_m = \omega C U_{mC}$.

Вывод. Таким образом, в синусоидальном режиме напряжение и ток в емкости — гармоники одной частоты, отличающиеся по фазе. Фаза тока в емкости превышает фазу напряжения на 90° . Это соотношение отражено на рис. 1.9, а.

Амплитуды напряжения и тока в емкости связаны соотношением

$$U_{mC} = I_m / (\omega C),$$

которое также можно трактовать как закон Ома, роль сопротивления выполняет величина $X_C = 1/(\omega C)$, называемая емкостным сопротивлением. Зависимость емкостного сопротивления от частоты представлена на рис. 1.9, б, согласно которому при $\omega \rightarrow 0$ $X_C \rightarrow \infty$, при $\omega \rightarrow \infty$ $X_C \rightarrow 0$.

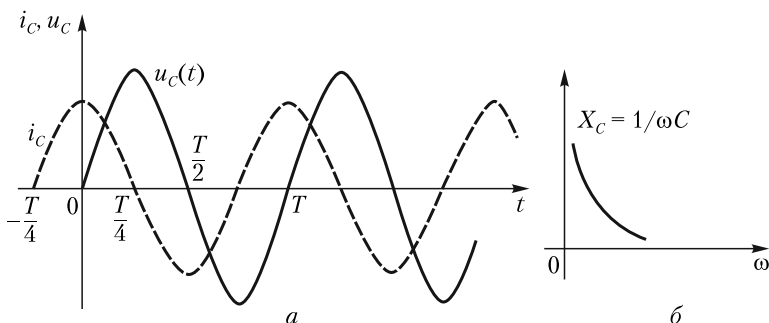


Рис. 1.9. Синусоидальный режим в емкости:

a — в синусоидальном режиме напряжение на емкости отстает по фазе от тока на 90° ; b — емкостное сопротивление $X_C = 1/(\omega C)$ обратно пропорционально частоте

Следовательно, при качественном анализе схем на низких частотах конденсаторы обрывают, а на высоких частотах — их закорачивают. Реальный конденсатор проявляет не только емкостные свойства, но и резистивные (главным образом по причине несовершенства изоляции между обкладками).

На рис. 1.10 представлена простейшая параллельная схема замещения конденсатора. Она содержит емкость C_ε и резистор R_ε .

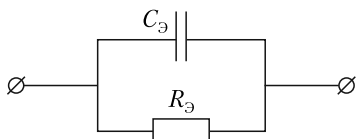


Рис. 1.10. Простейшая схема замещения конденсатора

В синусоидальном режиме соотношение между проводимостями эквивалентной емкости ωC_ε и резистивного элемента $g_\varepsilon = 1/R_\varepsilon$ характеризуется добротностью конденсатора

$$Q_C = \frac{\omega C_\varepsilon}{1/R_\varepsilon} = \omega C_\varepsilon R_\varepsilon.$$

Добротность реальных конденсаторов по определению является величиной безразмерной и на высоких частотах может достигать нескольких тысяч.

1.3. Активные элементы электрической цепи

В теории цепей вводится понятие двух видов активных элементов, наделенных идеальными свойствами. Это источники ЭДС и источники тока (на рис. 1.11, a , b они изображены в совокупности с внешней цепью).

1.3.1. Источник электродвижущей силы

Источник ЭДС (рис. 1.11, a) обеспечивает на своих зажимах напряжение (разность потенциалов), не зависящее от величины и направления протекающего через него тока. Для рис. 1.11, a

$$u_{a_0} = \varphi_a - \varphi_0 = E.$$

Эту величину будем называть интенсивностью источника ЭДС. Будучи подключенным к внешней цепи, идеальный источник ЭДС «навязывает»

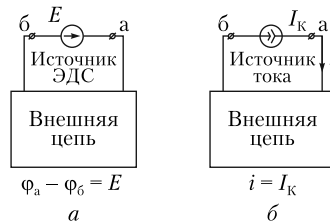


Рис. 1.11. Активные элементы электрической цепи:

a — источник ЭДС; обеспечивает на своих зажимах заданную разность потенциалов; b — источник тока; подает во внешнюю цепь ток заданной величины и направления

ей свои условия. Поэтому для внешней цепи (см. рис. 1.11, a) должны принять $\varphi_a - \varphi_b = E$.

Случай $E \rightarrow 0$: если интенсивность источника ЭДС падает до нуля, то для его внешней цепи это равносильно равенству потенциалов зажимов « a » и « b » ($\varphi_a = \varphi_b$), что соответствует режиму короткого замыкания — к.з. (рис. 1.12).

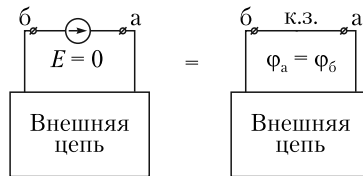


Рис. 1.12. Если интенсивность идеального источника ЭДС падает до нуля, он проявляет себя как короткозамкнутая перемычка

1.3.2. Источник тока

Источник тока (см. рис. 1.11, b) подает во внешнюю цепь ток $i = I_K$ в направлении, указанном стрелками, не зависящий от разности потенциалов на его зажимах. Величину I_K будем называть **интенсивностью источника тока**.

Таким образом, идеальный источник тока задает ток через все элементы, включенные с ним последовательно.

Случай $I_K \rightarrow 0$: если интенсивность источника тока падает до нуля, для внешней цепи это равносильно обрыву соответствующей ветви, так как $i = I_K = 0$ (рис. 1.13).

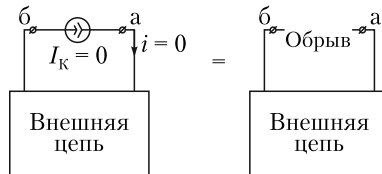


Рис. 1.13. Если интенсивность идеального источника тока падает до нуля, это равносильно обрыву его ветви

1.4. Реальный источник и его внешняя характеристика

На рис. 1.14 изображен реальный источник, нагруженный на переменное сопротивление R_n (сопротивление нагрузки).

Зависимость тока, отдаваемого источником во внешнюю цепь, от напряжения на его зажимах называется **внешней характеристикой источника**.

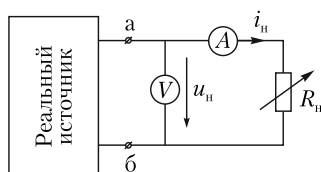


Рис. 1.14. Схема опытного определения внешней характеристики реального источника электрической энергии

Она может быть получена экспериментально по показаниям приборов амперметра и вольтметра при изменении сопротивления R_n (см. рис. 1.14).

Наиболее типичный вид внешней характеристики реального источника представлен на рис. 1.15 в двух вариантах: нелинейный (кривая 1) и линейный (прямая 2). Точки A и B пересечения внешней характеристики с осями координат соответствуют двум предельным значениям сопротивления нагрузки.

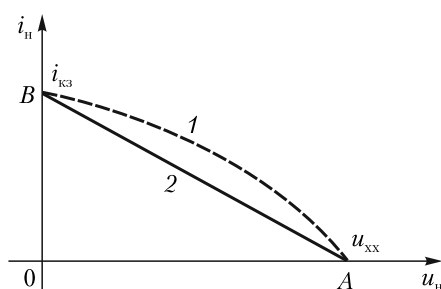


Рис. 1.15. Типичные виды внешней характеристики реального источника:

1 — нелинейная внешняя характеристика; 2 — линейная внешняя характеристика

Точка A ($i_n = 0$) получена при $R_n = \infty$, т.е. при разомкнутых зажимах «а», «б» (режим холостого хода источника). Отрезок OA определяет напряжение холостого хода u_{xx} — напряжение на разомкнутых зажимах источника.

Точка B ($u_n = 0$) получена при $R_n = 0$, т.е. в режиме короткого замыкания зажимов «а», «б». Ток, отдаваемый при этом источником, называется **током короткого замыкания**, обозначается $i_{кз}$ и на рис. 1.15 определяется отрезком OB .

Когда внешняя характеристика источника линейна (прямая 2 на рис. 1.15), она может быть получена по результатам двух опытов — холостого хода (рис. 1.16, а) и короткого замыкания (рис. 1.16, б). Вольтметр и амперметр на рис. 1.16 предполагаются идеальными.

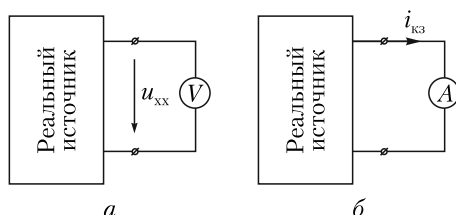


Рис. 1.16. Опыты холостого хода (а) и короткого замыкания внешних зажимов (б) реального источника

1.4.1. Простейшие схемы замещения реального источника

Вид внешней характеристики реального источника свидетельствует о том, что его свойства отличны от свойств идеальных источников ЭДС и тока. Реальный источник лишь при некоторых условиях может приближаться по своим свойствам к идеальному (либо источнику ЭДС, либо источнику тока).

В общем случае неидеальность реального источника учитывается при построении его расчетной модели (эквивалентной схемы замещения). Покажем, что активные двухполюсники, изображенные на рис. 1.17, *а*, *б*, обладают внешними характеристиками такого же вида, что и прямая 2 на рис. 1.15 (линейный случай).

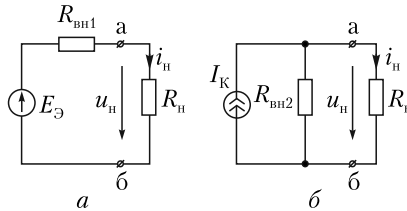


Рис. 1.17. Простейшие эквивалентные схемы реального источника:

а — последовательная; *б* — параллельная

Действительно, аналитические выражения внешних характеристик $i_n(u_n)$ для схем на рис. 1.17 определяются уравнениями:

- $u_n = E_{\mathcal{E}} - i_n R_{\text{вн}1}$ (схема на рис. 1.17, *а*);
- $i_n = I_{\text{КЭ}} - u_n / R_{\text{вн}1}$ (схема на рис. 1.17, *б*).

Соответствующие графики совпадают с прямой 2 на рис. 1.15 при условии выполнения следующих равенств:

$$E_{\mathcal{E}} = u_{\text{xx}}; \quad I_{\text{КЭ}} = i_{\text{кз}}; \quad R_{\text{вн}1} = R_{\text{вн}2} = u_{\text{xx}} / i_{\text{кз}}.$$

Поэтому схемы, изображенные на рис. 1.17, *а*, *б*, используют как простейшие расчетные модели (схемы замещения) реального источника. Напомним, что величины u_{xx} и $i_{\text{кз}}$ — физические характеристики реального источника: напряжение на разомкнутых внешних зажимах источника и ток через перемычку, замыкающую накоротко внешние зажимы (см. рис. 1.15).

Приведенная выше система трех равенств позволяет (при необходимости) проводить переход от последовательной схемы замещения (см. рис. 1.17, *а*) к параллельной (см. рис. 1.17, *б*) и наоборот.

1.4.2. Понятие внутреннего сопротивления реального источника.

Внутренние сопротивления идеальных источников ЭДС и тока

Если интенсивность активного элемента в схеме замещения реального источника (см. рис. 1.17, *а*, *б*) падает до нуля, двухполюсник начинает проявлять себя как пассивный элемент — резистор ($R_{\text{вн}1}$ либо $R_{\text{вн}2}$). Сопротивление этого резистора принято называть *внутренним сопротивлением источника*.

Очевидно, для источника с линейной внешней характеристикой (прямая 2 на рис. 1.15)

$$R_{\text{вн}} = u_{\text{xx}} / i_{\text{кз}} = R_{\text{вн}1} = R_{\text{вн}2}.$$

В схеме на рис. 1.17, *а* примем $R_{\text{вн1}} = 0$, приходим к идеальному источнику ЭДС. В схеме на рис. 1.17, *б* принимаем $R_{\text{вн2}} = \infty$, получаем идеальный источник тока. В изложенном смысле можно считать, что:

- $$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} E=0 \\ \text{---} \bigcirc \text{---} \end{array} & = & \begin{array}{c} R_{\text{BH}E}=0 \\ \text{---} \square \text{---} \end{array} \\
 a & &
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} I_K=0 \\ \text{---} \bigcirc \text{---} \end{array} & = & \begin{array}{c} R_{\text{BH}I_K}=\infty \\ \text{---} \square \text{---} \end{array} \\
 b & &
 \end{array}$$

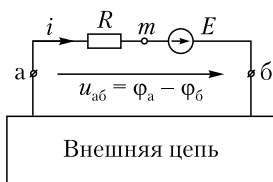
$$a - R_{\text{BH}_r} = 0; \delta - R_{\text{BH}_c} = \infty$$

На рис. 1.19 прямоугольником изображена произвольная цепь, включающая в себя пассивные и активные элементы. При помощи зажимов «а», «б» она может быть подключена к другой цепи с двумя зажимами.



Условимся разность потенциалов $u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ на схеме обозначать стрелкой, направленной от точки «а» к точке «б» (рис. 1.20). Стрелке противоположного направления будет соответствовать разность потенциалов $\varphi_b - \varphi_a$, обозначаемая как u_{ba} . Таким образом, $u_{ab} = -u_{ba}$ (см. рис. 1.19).

Точка *m* разбивает ветвь «аб» (см. рис. 1.20) на два участка: «am» — пассивный; «mb» — активный. Для пассивного участка «am» по закону Ома



26

$i = \frac{\varphi_a - \varphi_m}{R}$, для активного участка «тб» $E = \varphi_6 - \varphi_m$, или $\varphi_m = \varphi_6 - E$. С учетом последнего получаем

$$i = \frac{\varphi_a - \varphi_6 + E}{R} = \frac{u_{a6} + E}{R}. \quad (1.2)$$

Выражение (1.2) принято называть **обобщенным законом Ома**. В отличие от традиционного закона Ома числитель обобщенного закона Ома содержит в общем случае алгебраическую сумму напряжения на участке u_{a6} и ЭДС E . Причем эти слагаемые учитываются с положительными знаками, если их направления совпадают с положительным направлением тока i .

1.6. Топологические элементы электрической цепи

К топологическим элементам относятся ветви, узлы, контуры.

Ветвь — участок, содержащий один или несколько последовательно включенных элементов (через все элементы ветви течет один и тот же ток).

Узел — место соединения трех и большего числа ветвей.

Контур — замкнутый путь, проходящий по одной или нескольким ветвям. Ни один элемент при обходе контура не должен встречаться дважды.

Независимые контуры — это понятие относится к совокупности контуров. Каждый следующий контур независим по отношению к ранее выбранному, если в него входит хотя бы одна новая ветвь. Так, в цепи, показанной на рис. 1.21 шесть ветвей, четыре узла и три независимых контура.

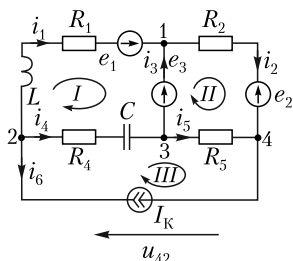


Рис. 1.21. Электрическая цепь с четырьмя узлами ($Y = 4$), шестью ветвями ($B = 6$) и тремя независимыми контурами

Пусть B — число ветвей схемы, Y — число узлов. Можно показать [4, 5], что число независимых контуров $n = B - (Y - 1)$.

1.7. Законы Кирхгофа

Главные законы теории электрических цепей, законы Кирхгофа, можно получить как следствие уравнений Максвелла.

Цепная расчетная модель реального электротехнического устройства имеет право на существование до тех пор, пока не нарушаются законы Кирхгофа. По этой причине недопустим к рассмотрению случай последовательного включения двух различных по интенсивности идеальных источников тока (нарушается первый закон Кирхгофа).

Аналогично мы не можем рассматривать два идеальных источника ЭДС различной интенсивности, включенных параллельно (нарушается второй закон Кирхгофа).