

Содержание

Предисловие к изданию на русском языке	21
Предисловие	23
Величины. Единицы. Наименования в СИ	24
Часть I. Электричество и его переменные	
Глава 1	
Что такое электричество?	28
1.1. Частицы. Электрические заряды и носители зарядов	28
1.1.1. Частицы и электрические заряды	28
1.1.2. Электростатические силы. Закон Кулона	29
1.1.3. Электрическое поле	30
1.2. Явление проводимости. Электрический ток	30
1.2.1. Электрический ток	30
1.2.2. Свободные и связанные заряды	31
1.2.3. Электрические среды	32
1.2.4. Влияние температуры	34
1.2.5. Частотные свойства. Поверхностный эффект в проводнике	34
1.3. Электрический потенциал заряда	35
1.3.1. Цель	35
1.3.2. Работа при переносе заряда Q на расстояние r от заряда q	36
1.3.3. Электрический потенциал	36
1.3.4. Разность электрических потенциалов. Электрическое напряжение	37
Глава 2	
Основные законы электричества	38
2.1. Двухполюсники	38
2.1.1. Определение. Условности	38
2.1.2. Линейный двухполюсник. Линейная цепь	38
2.1.3. Элементарные двухполюсники	39
2.1.4. Принципиальные ограничения использования двухполюсника	41
2.1.5. Характеристика двухполюсника	42
2.1.6. Рабочая точка двухполюсника	42
2.1.7. Соединение двухполюсников	43
2.2. Теоремы об электрических цепях	45



2.2.1.	Законы Кирхгофа	45	
2.2.2.	Пассивирование (компенсация) источника	46	
2.2.3.	Теорема суперпозиции	46	
2.2.4.	Теоремы Тевенена и Нортона.....	48	
2.2.5.	Теорема Миллмана	51	
2.2.6.	Делитель напряжения. Делитель тока	51	
2.2.7.	Теорема Кеннели. Преобразования треугольник-звезда и звезда-треугольник (эквивалентность схем звезда и треугольник)	52	
2.2.8.	Принцип линейности	53	
Глава 3			
Электростатика.....			54
3.1.	Электрическое поле и электрическая индукция.....	54	
3.1.1.	Напряженность	54	
3.1.2.	Поток через поверхность S	55	
3.1.3.	Теорема Гаусса	56	
3.2.	Электрический потенциал	57	
3.2.1.	Определение	57	
3.2.2.	Расчет электрического поля с использованием потенциала V	58	
3.3.	Принцип действия конденсатора	59	
3.3.1.	Устройство и принцип действия	59	
3.3.2.	Диэлектрическая прочность.....	60	
3.3.3.	Емкость и накопленный заряд конденсатора	60	
3.3.4.	Электрическая энергия, запасенная конденсатором.....	61	
Глава 4			
Электромагнетизм. Ферромагнетизм.....			63
4.1.	Магнитное поле	63	
4.1.1.	Физическая природа.....	63	
4.1.2.	Источники магнитного поля	63	
4.1.3.	Расчет вектора напряженности \vec{H} . Теорема Ампера	64	
4.2.	Магнитная индукция	68	
4.3.	Немагнитные среды.....	68	
4.4.	Ферромагнитные среды	69	
4.4.1.	Расчет напряженности магнитного поля и индукции	69	
4.4.2.	Относительная проницаемость среды μ_r	69	
4.4.3.	Динамическая проницаемость	70	
4.4.4.	Магнитные потери	71	

4.5.	Поток магнитной индукции.....	71
4.5.1.	Ориентирование поверхности S (рис. 4.11).....	71
4.5.2.	Поток через поверхность. Определения.....	71
4.5.3.	Идеальная магнитная цепь (ИМЦ).....	72
4.6.	Магнитное сопротивление идеальной магнитной цепи.....	72
4.7.	Поток самоиндукции.....	74
4.7.1.	Физическое явление.....	74
4.7.2.	Индуктивность. Определение.....	74
4.8.	Цепи с переменным потоком.....	75
4.8.1.	Физическое явление. Закон Фарадея.....	75
4.8.2.	Закон Фарадея.....	76
4.8.3.	Правило наибольшего потока.....	76
4.8.4.	Электромагниты.....	76

Глава 5

Установившиеся синусоидальные процессы в однофазных системах.....

5.1.	Свойства синусоидальных величин.....	78
5.2.	Установившиеся синусоидальные процессы. Методы расчетов.....	80
5.2.1.	Векторное построение Фрезеля.....	80
5.2.2.	Использование комплексных чисел.....	82
5.2.3.	Выражения для комплексных чисел.....	83
5.3.	Полные комплексные сопротивление и проводимость двухполюсника.....	83
5.4.	Мощности. Коэффициент мощности.....	85
5.5.	Добротность. Последовательно-параллельное преобразование.....	90
5.5.1.	Добротность.....	90
5.5.2.	Последовательно-параллельное преобразование.....	91
5.6.	Резонансные цепи.....	91
5.7.	Частотные свойства. Комплексная передаточная функция.....	94
5.7.1.	Передаточная функция.....	94
5.7.2.	Диаграмма Боде.....	97

Глава 6

Установившиеся синусоидальные процессы в трехфазных системах.....

6.1.	Трехфазные установки. Определения.....	100
6.2.	Соединения.....	104
6.2.1.	Соединение в звезду.....	104
6.2.2.	Соединение в треугольник.....	105



6.3.	Мощности. Коэффициент мощности	106
6.3.1.	Общий случай	106
6.3.2.	Трехфазные генератор и потребитель симметричны	106

Глава 7

Динамический режим. Среднее и действующее значения ... 109

7.1.	Динамический режим	109
7.2.	Среднее значение	110
7.2.1.	Среднее значение тока	110
7.2.2.	Определения (табл. 7.1)	110
7.3.	Действующее значение	112
7.3.1.	Действующее значение тока	112
7.3.2.	Определения (табл. 7.2)	112
7.4.	Разложение периодического сигнала	113
7.5.	Свойства сигнала	114

Глава 8

Периодический процесс. Ряды Фурье 117 |

8.1.	Ряды Фурье	117
8.1.1.	Основная теорема	117
8.1.2.	Расчет коэффициентов	118
8.1.3.	Соотношения между коэффициентами	118
8.1.4.	Свойства. Упрощение расчетов	118
8.1.5.	Формула Бесселя – Парсеваля	120
8.2.	Физический смысл периодических процессов	120
8.2.1.	Периодический режим. Периодический сигнал	120
8.2.2.	Разложение периодического сигнала. Терминология	120
8.2.3.	Действующее значение и средняя мощность	122
8.2.4.	Оценка сигнала	124
8.2.5.	Приложение к линейным системам	124
8.3.	Графическое представление спектров	126
8.3.1.	Представление в функции времени	126
8.3.2.	Частотные свойства	126
8.4.	Некоторые классические сигналы	129

Глава 9

Переходные процессы в линейной системе 133 |

9.1.	Линейная система	133
9.2.	Общий принцип исследования переходных процессов	134
9.2.1.	Воздействующие сигналы	134
9.2.2.	Математическое описание электрической цепи	134

9.2.3.	Решение дифференциального уравнения	135
9.2.4.	Переходный и установившийся режимы	137
9.3.	Линейная система первого порядка	137
9.3.1.	Методы решения дифференциального уравнения	137
9.3.2.	Переходная характеристика цепи	138
9.3.3.	Простейшие электрические схемы	140
9.4.	Линейная система второго порядка	146
9.4.1.	Последовательность решения дифференциального уравнения	146
9.4.2.	Переходная характеристика	148
9.4.3.	Элементарные электрические цепи	152

Глава 10

Символический метод. Преобразование Лапласа	155	
10.1.	Функция воздействия	155
10.2.	Единичные импульсы Дирака	156
10.2.1.	Определение и понятие	157
10.2.2.	Соотношения при единичной ступени	158
10.2.3.	Умножение функции на импульс Дирака	158
10.2.4.	Производная в точке разрыва	159
10.3.	Преобразование Лапласа	159
10.3.1.	Определение	159
10.3.2.	Таблица ПЛ некоторых распространенных функций	161
10.3.3.	Свойства и теоремы	161
10.3.4.	Нахождение изображения F функции f	163
10.3.5.	Нахождение оригинала f по изображению F	165
10.4.	Исследование линейной системы	169
10.4.1.	Использование ПЛ при исследовании линейной системы ...	169
10.4.2.	Передаточная функция Лапласа	171
10.4.3.	Импульсный отклик. Воздействие	171
10.4.4.	Соответствие передаточной функции дифференциальному уравнению	172
10.4.5.	Описание электрической цепи	173
10.4.6.	Временная характеристика	175
10.4.7.	Частотные свойства или гармоники	176
10.5.	Линейная система первого порядка	177
10.5.1.	Простейшие передаточные функции 0-го и 1-го порядка ..	178
10.5.2.	Простейшие электрические цепи	178
10.6.	Линейная система второго порядка	182
10.6.1.	Простейшие передаточные функции второго порядка (табл. 10.10)	182



10.6.2. Последовательная резонансная цепь (рис. 10.13)	183
--	-----

Часть II. Электронные компоненты

Глава 11

Сопротивления	186
11.1. Основная модель	186
11.1.1. Закон Ома. Сопротивление. Проводимость.	186
11.1.2. Соединение сопротивлений	187
11.1.3. Мощность рассеяния	188
11.2. Ограничения и допущения	188
11.2.1. Максимальная мощность	188
11.2.2. Температурный коэффициент	189
11.2.3. Свойства при высоких частотах	190
11.3. Переменные и подстроечные сопротивления. Потенциометры .	191

Глава 12

Конденсаторы	194
12.1. Основная модель	194
12.1.1. Соотношение между q , u и i . Емкость	194
12.1.2. Соединения конденсаторов	196
12.1.3. Электрическое поле. Электростатическая сила	197
12.1.4. Запасенная энергия	198
12.1.5. Непрерывность и стабильность электрических напряжения и заряда	198
12.1.6. Синусоидальный процесс	198
12.2. Ограничения и допущения	199
12.2.1. Разрушающее поле. Номинальное напряжение	199
12.2.2. Температурный коэффициент	199
12.2.3. Коэффициент напряжения	200
12.2.4. Частотные свойства	200

Глава 13

Индуктивно несвязанные катушки	203
13.1. Основная модель	203
13.1.1. Соотношения между Φ , i и u . Индуктивность	203
13.1.2. Соединение индуктивно несвязанных катушек	205
13.1.3. Энергия, запасенная в линейной катушке	207
13.1.4. Непрерывность и стабильность тока и потока	207
13.1.5. Синусоидальный процесс	207

13.2. Ограничения и допущения.....	208
13.2.1. Наибольший ток. Номинальный ток.....	208
13.2.2. Температурный коэффициент	208
13.2.3. Токовый коэффициент	208
13.2.4. Частотные свойства катушки без рассеяния и без потерь в железе.....	209
13.2.5. Потери в железе. Рассеяние	210
13.2.6. Нелинейности при магнитном сердечнике.....	211

Глава 14

Индуктивно связанные катушки	213
14.1. Основная модель	213
14.1.1. Индуктивная связь. Взаимная индуктивность	213
14.1.2. Соединения двух индуктивно связанных катушек.....	216
14.1.3. Запасаемая энергия индуктивно связанными катушками ..	216
14.1.4. Поток рассеяния. Поток намагничивания	216
14.1.5. Синусоидальный процесс.....	218
14.2. Ограничения и допущения.....	219
14.2.1. Сопротивления проводов. Распределенные емкости катушек. Емкость связи катушек	219
14.2.2. Потери в железе. Нелинейности	220

Глава 15

Трансформаторы	221
15.1. Введение.....	221
15.2. Идеальный трансформатор (И.Т.)	222
15.2.1. Гипотезы. Эквивалентная схема	222
15.2.2. Синусоидальный процесс.....	222
15.3. Трансформатор без потерь и рассеяния (Т.Б.П.Р.)	225
15.4. Трансформатор с рассеянием и потерями в меди	226
15.5. Трансформатор с рассеянием магнитного потока, потерями в меди и в железе	228
15.6. Трансформатор Каппа.....	228
15.7. Реальный трансформатор. Нелинейности	229

Глава 16

Диоды	232
16.1. Диоды с PN-переходом	232
16.1.1. Обозначение. Устройство	232
16.1.2. Идеальная модель (рис. 16.3)	233

16.1.3.	Кусочно-линейная модель (рис. 16.4)	233
16.1.4.	Основная модель	234
16.1.5.	Ограничения и допущения	237
16.2.	Особенности некоторых диодов	241
16.2.1.	Диоды выпрямителей	241
16.2.2.	Диоды Зенера. Диоды — стабилизаторы напряжения (стабилитроны)	241
16.2.3.	Диоды Шоттки	243
16.2.4.	Диоды с переменной емкостью (варикапы)	243
16.2.5.	PIN-диоды	244
16.2.6.	Туннельные диоды	244

Глава 17

Биполярные транзисторы	246	
17.1.	Условные обозначения. Устройство	246
17.2.	Транзистор NPN-типа	247
17.2.1.	Основная модель	247
17.2.2.	Ограничения и допущения	254
17.3.	PNP-транзистор	259
17.4.	Специальные транзисторы	259
17.4.1.	Схема Дарлингтона	259
17.4.2.	Два дополнительных транзистора	260
17.4.3.	Транзистор Шоттки	261

Глава 18

МОП-транзисторы	262	
18.1.	Условные обозначения. Устройство	262
18.2.	N-канальный обогащенный полевой транзистор	263
18.2.1.	Основная модель	263
18.2.2.	Ограничения и допущения	269
18.3.	P-канальный обогащенный полевой транзистор	273
18.3.1.	Основная модель	273
18.3.2.	Ограничения и допущения	275
18.4.	Обедненный полевой МОП-транзистор	275
18.5.	Логический уровень полевого транзистора	276
18.6.	Полевой МОП-транзистор для измерения тока	276
18.7.	Полевой МОП-транзистор с быстрым диодом	278
18.8.	Биполярный транзистор с изолированным затвором	278

Глава 19

Тиристоры	280
------------------------	-----

19.1. Управляемые выпрямители (УВ)	280
19.1.1. Назначение. Условное обозначение.....	280
19.1.2. Идеальная модель.....	280
19.1.3. Устройство. Модель двух наслоенных транзисторов	281
19.1.4. Вольт-амперная характеристика (рис. 19.5)	282
19.1.5. Отпирание УВ	283
19.1.6. Запирание УВ.....	284
19.1.7. Аспекты времени	284
19.1.8. Принципиальные ограничения.....	284
19.2. Двухоперационные тиристоры	285
19.3. Семистор	286
19.3.1. Принцип действия. Условное обозначение.....	286
19.3.2. Идеальная модель (рис. 19.9)	286
19.3.3. Устройство. Эквивалентная схема двух УВ (рис. 19.10)	287
19.3.4. Вольт-амперная характеристика (рис. 19.11).....	287
19.3.5. Управление семистором.....	287
19.3.6. Запирание семистора	289
19.3.7. Время.....	289
19.4. Импульсный диод.....	289
19.4.1. Принцип действия. Обозначение (рис. 19.13)	289
19.4.2. Модель, близкая к идеальной	290
19.4.3. Вольт-амперная характеристика (рис. 19.15).....	290
19.5. Проблемы внедрения тиристоров и семисторов	291
19.5.1. Скорость изменения напряжений u_{AK} и u_{A2A1}	291
19.5.2. Максимальные значения напряжений u_{AK} и u_{A2A1}	293
19.5.3. Максимальное значение тока i_A	294
19.5.4. Скорость изменения тока i_A	294
Глава 20	
Фотоэлементы	295
20.1. Общие вопросы	295
20.1.1. Фотон. Электромагнитная волна.....	295
20.1.2. Оптические величины и единицы измерения	295
20.1.3. Зрительное восприятие человека	295
20.1.4. Инфракрасное излучение.....	298
20.1.5. Оптоэлектронные эмиттеры или антенны (рис. 20.2).....	298
20.1.6. Оптоэлектронные приемники (рис. 20.3).....	298
20.2. Светодиоды.....	299
20.2.1. Условное обозначение. Световые величины. Модели.....	299
20.2.2. Типы проводимости.....	300
20.3. Диоды LASER	302

20.4.	Фотодиоды	303
20.4.1.	Условное обозначение (рис. 20.8)	303
20.4.2.	Основная модель	303
20.4.3.	Динамическая модель	305
20.4.4.	Рабочие режимы	305
20.5.	Фототранзисторы	307
20.6.	Солнечные батареи	308
20.7.	Оптроны	308

Глава 21

Операционные усилители 310

21.1.	Условное обозначение. Структура	310
21.2.	Простейшая идеальная модель	311
21.3.	Ограничения и допущения	312
21.3.1.	Напряжение смещения. Токи поляризации	312
21.3.2.	Частотные свойства	314
21.3.3.	Полные входное и выходное сопротивления	316
21.3.4.	Коэффициент подавления синфазной составляющей	318
21.3.5.	Максимальная скорость изменения выходного напряжения ...	318

Глава 22

Аналоговые компараторы 320

22.1.	Условные обозначения. Описание	320
22.2.	Элементарная модель. Идеальная модель	321
22.3.	Ограничения и допущения	322

Глава 23

Тепловые потери 325

23.1.	Электрические аналоги тепловой модели	325
23.2.	Пути тепловых потерь	326
23.3.	Статическая тепловая модель (непрерывная)	326
23.4.	Динамическая тепловая модель (переходная)	327
23.4.1.	Последовательность импульсов мощности в установившемся режиме	328
23.4.2.	Единственный импульс мощности	331
23.4.3.	Наложение последовательности импульсов мощности на постоянную составляющую	332
23.5.	Составляющие охлаждения	332

Часть III. Электронные устройства

Глава 24

Аналоговые фильтры	334
24.1. Назначение. Идеальные фильтры.....	334
24.2. Элементарные передаточные функции	336
24.2.1. Передаточные функции первого порядка.....	336
24.2.2. Передаточные функции второго порядка	338
24.3. Аппроксимация идеальных аналоговых фильтров	345
24.4. Эталонная частота. Неискажающий фильтр.....	348

Глава 25

Усиление и аналоговые операции	351
25.1. Общие вопросы. Определения	351
25.2. Усиление по напряжению.....	355
25.3. Усиление по току	358
25.4. Преобразование ток-напряжение (полное переходное сопротивление)	359
25.5. Преобразователь напряжение – ток (полная переходная проводимость)	360
25.6. Дифференциальное усиление.....	362
25.6.1. Усилитель элементарных разностей	363
25.6.2. Дифференциальный подстроечный усилитель	365
25.6.3. Разделительный дифференциальный усилитель	366
25.7. Усиление мощности	367
25.7.1. Общие вопросы. Определения	367
25.7.2. Усиление в режиме А	368
25.7.3. Усиление в режиме В. Двухтактная схема.....	369
25.7.4. Усиление в режиме АВ.....	371
25.7.5. Усиление в режиме D.....	371
25.8. Согласование сопротивления.....	372
25.8.1. Введение	372
25.8.2. Согласование на выходе	372
25.8.3. Согласованные четырехполюсники	373
25.9. Другие аналоговые операции с сигналами.....	374
25.9.1. Сумматор	374
25.9.2. Дифференцирующий усилитель	376
25.9.3. Интегратор	377
25.9.4. Обратные функции и операции	378
25.9.5. Умножитель	379

Глава 26

Преобразование сигналов	382
26.1. Введение	382
26.2. Дифференциальное исчисление. Чувствительность	382
26.3. Приближенные расчеты методом малых приращений	384
26.4. Ошибки. Погрешности. Допуски	386
26.5. Калибровка	389

Глава 27

Замкнутые системы: обратная связь.

Генераторы колебаний	392
27.1. Принцип построения замкнутых систем. Обратная связь	392
27.1.1. Блок-схема с сумматором на входе (рис. 27.1)	392
27.1.2. Блок-схема с вычитающим устройством на входе	396
27.2. Ввод обратной связи через усилитель	397
27.2.1. Эффекты обратной связи	398
27.2.2. Четыре структуры реакций	398
27.3. Генераторы синусоидальных колебаний	402
27.3.1. Блок-схема генератора синусоидальных колебаний	402
27.3.2. Генераторы синусоидальных колебаний тока	403

Глава 28

Аналоговое сравнение	409
28.1. Сравнение сигналов	409
28.2. Гистерезисное сравнение	410
28.3. Сравнение в окне	412

Глава 29

Генераторы прямоугольных сигналов	415
29.1. Ждущий мультивибратор	415
29.2. Несинхронизированный мультивибратор	417
29.3. Запаздывание. Выдержка времени	420
29.4. Практические соображения	423
29.4.1. RC-цепь при воздействии ступенчатым напряжением или током	423
29.4.2. Подключение конденсатора непосредственно к источнику тока	424

Глава 30**Цифро-аналоговое и аналого-цифровое преобразования..... 426**

- 30.1. Определения 426
- 30.2. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 427
- 30.3. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)..... 428
- 30.4. Используемые в ЦАП и АЦП коды 430
 - 30.4.1. Основные коды для униполярных преобразователей..... 430
 - 30.4.2. Основные коды для биполярных преобразователей 432
- 30.5. Описания ЦАП И АЦП 435
 - 30.5.1. Статические свойства..... 435
 - 30.5.2. Динамические характеристики 437

Часть IV. Силовая электроника**Глава 31****Неуправляемое выпрямление 440**

- 31.1. Однофазное однополупериодное выпрямление 441
 - 31.1.1. Активная нагрузка (рис. 31.1 и 31.2)..... 441
 - 31.1.2. Сглаживание выходного напряжения (рис. 31.3 и 31.4) 442
 - 31.1.3. Сглаживание выходного тока (рис. 31.6 и 31.7) 444
- 31.2. Однофазное двухполупериодное выпрямление 445
 - 31.2.1. Активная нагрузка..... 445
 - 31.2.2. Сглаживание выходного напряжения (рис. 31.12)..... 447
 - 31.2.3. Сглаживание выходного тока (рис. 31.14 и 31.15) 448
- 31.3. Однополупериодное трехфазное выпрямление 449
 - 31.3.1. Резистивная нагрузка (рис. 31.16 и 31.17) 449
 - 31.3.2. Сглаживание выходного напряжения 450
 - 31.3.3. Сглаживание выходного тока 451
- 31.4. Мостовая схема трехфазного двухполупериодного выпрямления ... 451
 - 31.4.1. Резистивная нагрузка (рис. 31.18 и 31.19) 451
 - 31.4.2. Сглаживание выходного напряжения 453
 - 31.4.3. Сглаживание выходного тока 453
- 31.5. Основные характеристики схем выпрямления 454

Глава 32**Управляемые выпрямители 455**

- 32.1. Однофазное однополупериодное выпрямление 455
 - 32.1.1. Выпрямитель без разрядного диода..... 455
 - 32.1.2. Выпрямитель с разрядным диодом 457
- 32.2. Однофазное двухполупериодное выпрямление 459

32.2.1.	Симметричный мост без разрядного диода.....	459
32.2.2.	Симметричная мостовая схема с разрядным диодом	467
32.2.3.	Смешанные мостовые схемы	468
32.3.	Трехфазное однополупериодное выпрямление.....	468
32.3.1.	Выпрямитель без разрядного диода.....	468
32.3.2.	Выпрямитель с разрядным диодом	472
32.4.	Трехфазное двухполупериодное выпрямление.....	473
32.4.1.	Симметричный мост без разрядного сопротивления	473
32.4.2.	Симметричный мост с разрядным диодом	477
32.4.3.	Смешанный мост	477
32.5.	Коэффициент мощности выпрямителя	479
32.6.	Критерии выбора.....	480

Глава 33

Преобразователи постоянного тока..... 482

33.1.	Последовательный вольтопонижающий регулятор	482
33.1.1.	Принцип действия (рис. 33.2).....	482
33.1.2.	Последовательный регулятор со сглаживанием тока (рис. 33.3)	483
33.2.	Параллельный вольтоповышающий регулятор	487
33.2.1.	Принцип действия (рис. 33.6).....	487
33.2.2.	Параллельный регулятор со сглаживанием напряжения....	488
33.3.	Регулятор с индуктивным накоплением.....	493
33.4.	Двухквadrантный или полумостовой регулятор	495
33.4.1.	Принцип действия.....	495
33.4.2.	Двухквadrантный регулятор со сглаживанием тока.....	496
33.5.	Четырехквadrантный или мостовой регулятор	497
33.5.1.	Принцип действия (рис. 33.17)	497
33.5.2.	Четырехквadrантный регулятор со сглаживанием тока ...	499

Глава 34

Источники импульсного питания..... 502

34.1.	Преобразователи без гальванической развязки.....	502
34.1.1.	Вольтопонижающий преобразователь	502
34.1.2.	Вольтоповышающий преобразователь (рис. 34.4).....	506
34.1.3.	Инвертирующий напряжение преобразователь (рис. 34.6) .	509
34.2.	Преобразователи с гальванической развязкой	511
34.2.1.	Преобразователь с рекуперацией энергии (рис. 34.8).....	511
34.2.2.	Преобразователь прямой передачи энергии с гальванической развязкой	516

Глава 35**Статические реле. Плавные регуляторы..... 521**

- 35.1. Статические реле 521
 - 35.1.1. Состав — электронный прерыватель переменного тока.... 521
 - 35.1.2. Принцип действия 522
- 35.2. Плавные регуляторы 532
 - 35.2.1. Управление углом проводимости 533
 - 35.2.2. Управление изменением количества полных периодов..... 535
 - 35.2.3. Трехфазные плавные регуляторы 536

Глава 36**Независимые инверторы 537**

- 36.1. Основной принцип построения 537
- 36.2. Мостовой инвертор напряжения..... 538
 - 36.2.1. Симметричное управление. Индуктивная нагрузка 539
 - 36.2.2. Управление со сдвигом. Индуктивная нагрузка 541
 - 36.2.3. Ступенчатое напряжение 542
 - 36.2.4. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)..... 544
- 36.3. Принцип построения трехфазных инверторов 550

Часть V. Электрические машины**Глава 37****Энергетика 551**

- 37.1. Энергетический баланс 551
- 37.2. Работа силы. Работа момента..... 553
 - 37.2.1. Работа силы 553
 - 37.2.2. Работа момента сил 553
- 37.3. Уравнение движения 555
- 37.4. Момент инерции твердого тела относительно оси вращения ... 556
- 37.5. Идеальные характеристики нагрузок..... 557
- 37.6. Сравнительная оценка двигателей 559

Глава 38**Трансформаторы при синусоидальном питании
и постоянной частоте 560**

- 38.1. Использование. Принципиальная схема. Режимы 560
- 38.2. Идеальный трансформатор..... 561
 - 38.2.1. Режим трансформации 561
 - 38.2.2. Синусоидальный режим 561

38.3. Реальный трансформатор	562
38.4. Трехфазный трансформатор.....	565
38.4.1. Устройство.....	565
38.4.2. Группы соединений обмоток	565
38.4.3. КПД и модель.....	567

Глава 39

Вращающиеся поля.....	569
39.1. Вращающиеся машины переменного тока.....	569
39.1.1. Устройство.....	569
39.1.2. Определения	569
39.2. Распределение магнитного поля в зазоре.....	570
39.2.1. Двухполюсная машина	570
39.2.2. Многополюсная машина	572
39.3. Создание вращающегося поля	572
39.3.1. Эффект вращающихся полей.....	572
39.3.2. Вращение многополюсного ротора.....	573
39.3.3. Трехфазные многополюсные обмотки	574
39.4. Однофазная обмотка	575
39.5. Двухфазная обмотка.....	576

Глава 40

Трехфазные синхронные машины	577
40.1. Устройство. Принцип действия. Возбуждение	577
40.2. Трехфазный генератор.....	579
40.2.1. Холостой ход.....	579
40.2.2. Автономный генератор под нагрузкой	580
40.2.3. Эквивалентная модель приведенной к статору машины	580
40.2.4. Баланс мощностей. КПД	582
40.2.5. Подключение к сети	583
40.3. Синхронный двигатель	585
40.3.1. Упрощенная модель. Баланс мощностей и момент.....	585
40.3.2. Пуск. Регулирование скорости	586
40.3.3. Ведомый полем синхронный двигатель.....	586
40.4. Бесконтактный двигатель	587
40.4.1. Описание	587
40.4.2. Принцип действия двигателя с прямоугольными токами ..	587
40.4.3. Заключение	591
40.5. Использование синхронных машин	591

Глава 41

Трехфазные асинхронные двигатели	592
41.1. Устройство. Принцип действия. Скольжение.....	592
41.1.1. Устройство.....	592
41.1.2. Принцип действия	593
41.1.3. Скольжение.....	593
41.2. Баланс мощностей. КПД	594
41.3. Модель и характеристики	595
41.4. Пуск.....	597
41.5. Регулирование скорости.....	597
41.6. Обратимость. Торможение	598
41.6.1. Торможение.....	598
41.7. Асинхронный однофазный двигатель.....	598

Глава 42

Шаговые двигатели	599
42.1. Принцип действия и определения	599
42.1.1. Принцип действия	599
42.1.2. Определения.....	599
42.1.3. Двигатели с постоянными магнитами	600
42.1.4. Двигатели с переменной магнитной проницаемостью или реактивные (рис. 42.4)	602
42.1.5. Гибридные двигатели	602
42.2. Свойства.....	603
42.3. Каскад мощности.....	603
42.4. Статический и динамический режимы	604
42.4.1. Статический режим	604
42.4.2. Динамический режим	605
42.5. Использование	606

Глава 43

Машины постоянного тока	607
43.1. Основы	607
43.1.1. Принцип действия. Обратимость. Устройство	607
43.1.2. ЭДС. Модель. Момент. Скорость	609
43.2. Двигатель независимого возбуждения	611
43.2.1. Схема. Пуск. Регулирование скорости.....	611
43.2.2. Баланс мощностей. КПД	612
43.2.3. Характеристики (табл. 43.2).....	613
43.2.4. Торможение.....	613

43.3.	Двигатель последовательного возбуждения.....	613
43.3.1.	Схема. Пуск. Регулирование скорости.....	613
43.3.2.	Баланс мощностей. КПД.	614
43.3.3.	Характеристики двигателя последовательного возбужде- ния (табл. 43.2)	615
43.3.4.	Торможение.....	616
43.3.5.	Универсальный двигатель	616
Предметный указатель.....		617

Предисловие к изданию на русском языке

Практическая деятельность общества и человека происходит в рамках своеобразного треугольника: материя – информация – энергия. Среди многообразия форм существования материи доминирующие позиции сегодня, в силу неисчерпаемых возможностей, принадлежат электрической энергии. Нельзя не отметить возрастающую сложность современных устройств различной мощности – от микроватт до многих мегаватт. Обслуживание такой техники, а тем более ее создание, требует высокого уровня знаний электротехники, наличия, можно сказать, определенного уровня электротехнической культуры.

Система подготовки инженерно-технических кадров в высшей школе России предусматривает для студентов электротехнических специальностей трехсеместровое изучение курса «Теоретические основы электротехники» с последующим изучением соответствующих профилирующих дисциплин: «Электрические машины», «Электроснабжение промышленных предприятий», «Промышленная электроника» и т. д. в зависимости от специализации. Для студентов технических специальностей, тесно не связанных с электротехникой, дается курс «Общей электротехники», в котором, кроме основ предмета, изучаются также прикладные вопросы, выбор которых зависит от специализации, т. е. с акцентом на электронику, на электромеханику, на электроснабжение и т. п. Этим обусловлено издание многих учебников и учебных пособий по общей электротехнике с основами тех или иных прикладных дисциплин. Изучение этой дисциплины начинается обычно со второго курса.

В настоящее время в российской системе подготовки специалистов идет процесс формирования трехуровневой системы образования: бакалавр – инженер – магистр. Во многих западных странах, в том числе и во Франции, эта система существует уже десятилетия, накоплен большой опыт. В соответствии с ней разрабатываются методические материалы, учебные программы и планы, издаются учебники и пособия по практическому усвоению теоретического материала. Одной из таких разработок и является предлагаемый учебник по общей электротехнике коллектива французских авторов.

Следует отметить, что кроме общетеоретических материалов от азов электростатики до сложных вопросов анализа динамики электрических цепей в прикладной части учебника ярко представлена тема электроники во всем ее многообразии. Особенностью учебника является стремление авторов совместить формальную строгость изложения с прозрачностью толкования сложных вопросов. В учебнике много расчетов, сделанных

на основе излагаемого теоретического материала. В свою очередь, теоретическая часть позволяет, после знакомства с основами фундаментальных выводов и правил, продолжить совершенствование знаний. Так, например, раздел, посвященный периодическим процессам, излагается в объеме, достаточном для практического использования. Интересные выводы завершаются формулой Бесселя – Парсеваля, которая может быть эффективно использована при изучении энергетических процессов в электротехнических устройствах. Далее авторы излагают физический смысл рассмотренных математических преобразований.

Разумеется, учебник не универсален. Его нельзя «в чистом виде» применять в учебном процессе «типового» учебного заведения. Но его содержание может факультативно использоваться в учебном процессе как студентами, так и преподавателями. Масштаб использования учебника, конечно, будет определяться учебной программой или преподавателем. Книга представляет практический интерес и как методический материал системы многоступенчатой подготовки специалистов, а также будет полезна для самостоятельной работы над материалом.

к. т. н. В. Н. Грасевич

Предисловие

Этот труд представляет собой единство справочных материалов и методов электротехники, излагаемых в 43-х главах, тематически разделенных на 5 частей:

- электричество и его переменные (физические явления, законы электричества, синусоидальные и периодические процессы, частотные и временные отклики и т. д.);
- электронные компоненты (от сопротивлений до операционных усилителей, индуктивно связанные катушки, тиристоры и фотоэлементы, их модели и предельные свойства, тепловое рассеяние);
- электронные устройства (фильтры, усилители, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и т. д.);
- силовая электроника (выпрямители, преобразователи постоянного тока, импульсные источники питания, плавные регуляторы, инверторы);
- электрические машины (трансформаторы, двигатели: синхронные, асинхронные, шаговые, постоянного тока).

Многочисленные примеры приводятся в форме вопросов-ответов.

Учебник предназначен для студентов, в том числе после получения степени бакалавра. Он обеспечивает связь знаний среднего и высшего образований. Возможными являются многие уровни изучения. Многие формулировки воспринимаются к окончанию среднего и к началу первого цикла специального образования; прочие — в последующем.

Этот труд адресован:

- студентам институтов технических университетов, бакалаврам, учащимся подготовительных курсов, школ инженеров, а также специализирующимся по электротехнике, электронике, промышленной информатике;
- вольным слушателям, для которых самостоятельное образование является необходимостью;
- действующим профессионалам-исследователям моделей и методов.

Авторы

Величины. Единицы. Наименования в СИ

Величина		Единица	
Обозначение	Название	Обозначение	Наименование
a	Ускорение	м/с ²	Метр на секунду в квадрате
B	Магнитная индукция	Тл	Тесла
C	Электрическая емкость	Ф	Фарада
C _{Тн} , C _θ	Термическая емкость	Дж/К	Джоуль на кельвин
E	Напряженность электрического поля	В/м	Вольт на метр
f	Частота	Гц	Герц
F	Сила	Н	Ньютон
F _м	Магнитодвижущая сила	А	Ампер
ε	Диэлектрическая проницаемость	Ф/м	Фарада на метр
G	Электрическая проводимость	См	Сименс
H	Напряженность магнитного поля	А/м	Ампер на метр
i, I	Электрический ток	А	Ампер
ℓ, L	Длина	м	Метр
L	Собственная индуктивность	Гн	Генри
m	Масса	кг	Килограмм
μ	Магнитная проницаемость	Гн/м	Генри на метр
M	Момент силы	Нм	Ньютонметр
M	Взаимная индуктивность	Гн	Генри
p, P	Мощность, тепловой поток	Вт	Ватт
q, Q	Количество электричества, электрический заряд	Кл	Кулон
Q	Реактивная мощность	вар	Вольт-ампер реактивный
r, R	Сопротивление электрическое	Ом	Ом
R _{Тн} , R _θ	Сопротивление термическое	К/Вт	Кельвин на ватт
S	Кажущаяся мощность	ВА	Вольт-ампер
t	Время	с	Секунда

T, θ	Температура	К, °С	Кельвин, градус Цельсия
u, U	Разность потенциа- лов, напряжение	В	Вольт
v, V	Электрический по- тенциал	В	Вольт
v	Скорость	м/с	Метр в секунду
w, W	Энергия, работа, ко- личество теплоты	Дж	Джоуль
α	Угловое ускорение	рад/с	РадIAN в секунду
φ, Φ	Поток магнитной ин- дукции	Вб	Вебер
λ	Длина волны	м	Метр
ω	Угловая скорость	рад/с	РадIAN в секунду

Приставки к наименованиям единиц в системе СИ

Приставка		Множитель	Приставка		Множитель
Символ	Название		Символ	Название	
Э	экса	10 ¹⁸	д	деци	10 ⁻¹
П	пента	10 ¹⁵	с	санти	10 ⁻²
Т	тера	10 ¹²	м	мили	10 ⁻³
Г	гига	10 ⁹	мк	микро	10 ⁻⁶
М	мега	10 ⁶	н	нано	10 ⁻⁹
к	кило	10 ³	п	пико	10 ⁻¹²
г	гекто	10 ²	ф	фемто	10 ⁻¹⁵
да	дека	10	а	атто	10 ⁻¹⁸

Децибелы. Отношение двух величин можно выразить либо простым частным, либо логарифмом этого частного. Чаще всего используют десятичный логарифм, обозначаемый как \log_{10} или проще \log .

Отношение мощностей, выраженное в беллах¹ (Б), определяется как:

$$\log \frac{P_2}{P_1}.$$

Отношение мощностей, выраженное в децибелах (дБ), определяется как:

$$10 \log \frac{P_2}{P_1},$$

где 1 Б = 10 дБ.

¹Graham Bell (1847–1922).

Полагая, что p_2 и p_1 являются мощностями рассеяния в двух сопротивлениях, равных R_0 , получим:

$$p_1 = \frac{u_1^2}{R_0} = R_0 i_1^2 \quad \text{и} \quad p_2 = \frac{u_2^2}{R_0} = R_0 i_2^2,$$

откуда следует:

$$10 \log \frac{p_2}{p_1} = 20 \log \frac{u_2}{u_1} = 20 \log \frac{i_2}{i_1}.$$

Следовательно, обобщая, получим отношение напряжений u_2 к u_1 и отношение токов i_2 к i_1 , выраженные в децибелах, в виде:

$$20 \log \frac{u_2}{u_1} \quad \text{и} \quad 20 \log \frac{i_2}{i_1}.$$

Предшествующие определения дают относительные уровни p_2 по отношению к p_1 , u_2 по отношению к u_1 , i_2 по отношению к i_1 . Для получения абсолютных уровней следует условно зафиксировать эталонное значение.

Для эталонной мощности 1 Вт мощность $p = p(t)$, выраженная в децибелах по отношению к 1 Вт (дБ Вт), определится как

$$P_{(\text{дБ Вт})} = 10 \log \frac{P_{(\text{Вт})}}{1_{(\text{Вт})}} = 10 \log p_{(\text{Вт})}.$$

Для эталонной мощности 1 мВт мощность $p = p(t)$, выраженная в децибелах по отношению к 1 мВт (дБ мВт), определится как

$$P_{(\text{дБ мВт})} = 10 \log \frac{P_{(\text{Вт})}}{10^{-3}_{(\text{Вт})}} = 10 \log \frac{P_{(\text{мВт})}}{1_{(\text{мВт})}} = 10 \log p_{(\text{мВт})}.$$

Для эталонного напряжения 1 В напряжение $u = u(t)$, выраженное в децибелах по отношению к 1 В (дБ В), определится выражением:

$$u_{(\text{дБ В})} = 200 \log \frac{u_{(\text{В})}}{1_{(\text{В})}} = 20 \log u_{(\text{В})}.$$

Соотношение между (дБ мВт) и (дБ В). Пусть u — напряжение на зажимах сопротивления R_0 , рассеиваемая мощность составит $p = u^2/R_0$, откуда

$$P_{(\text{дБ мВт})} = u_{(\text{дБ В})} - 10 \log \frac{R_0}{1000} \quad \Rightarrow \quad P_{\text{ср} (\text{дБ мВт})} = U_{\text{д} (\text{дБ В})} - 10 \log \frac{R_0}{1000},$$

где $P_{\text{ср} (\text{дБ мВт})}$ — средняя мощность в децибелах по отношению к 1 мВт; $U_{\text{д} (\text{дБ В})}$ — действующее значение напряжения в децибелах по отношению к 1 В.

$$\text{Для } R_0 = 600 \text{ Ом} \quad \Rightarrow \quad P_{(\text{дБ мВт})} \approx u_{(\text{дБ В})} + 2,22;$$

$$R_0 = 50 \text{ Ом} \quad \Rightarrow \quad P_{(\text{дБ мВт})} \approx u_{(\text{дБ В})} + 13,01.$$

Для напряжения, отличного от $\sqrt{0,6} \text{ В} \approx 0,775 \text{ В}$, напряжение $u = u(t)$, выраженное по отношению к нему в децибелах, составит:

$$u_{(\text{дБ } u)} = 20 \log \frac{u_{(\text{В})}}{\sqrt{0,6}_{(\text{В})}} \approx 20 \log \frac{u_{(\text{В})}}{0,775_{(\text{В})}}.$$

Примечание. В телефонии полное эталонное сопротивление исторически было определено в Европе как чистое сопротивление в 600 Ом (в США 900 Ом), которое грубо соответствует среднему полному сопротивлению абонентской линии в частотной полосе пропускания от 300 до 3400 Гц. Тогда для эталонной мощности 1 мВт получим значение действующего эталонного напряжения $\sqrt{0,6} \approx 0,775 \text{ В}$, откуда следует определение децибел напряжения.

Соотношение между (дБ мВт) и (дБ u). Пусть u — напряжение на зажимах сопротивления R , мощность рассеяния составляет $p = u^2/R$, откуда

$$P_{(\text{дБ мВт})} = u_{(\text{дБ } u)} - 10 \log \frac{R}{600} \quad \Rightarrow \quad P_{\text{ср } (\text{дБ мВт})} = U_{\text{д}} - 10 \log \frac{R}{600}.$$

$$\text{Для } R_0 = 600 \text{ Ом} \quad \Rightarrow \quad P_{(\text{дБ мВт})} = u_{(\text{дБ } u)};$$

$$R_0 = 150 \text{ Ом} \quad \Rightarrow \quad P_{(\text{дБ мВт})} \approx u_{(\text{дБ } u)} + 6,02.$$

Соотношение между (дБ u) и (дБ В):

$$u_{(\text{дБ } u)} \approx u_{(\text{дБ В})} + 2,22.$$

ЧАСТЬ I

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЕГО ПЕРЕМЕННЫЕ

ГЛАВА I

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО?

1.1. Частицы. Электрические заряды и носители зарядов

(Развитие темы см. гл. 3. Электростатика)

1.1.1. Частицы и электрические заряды

После открытия электрона стало очевидным существование многих частиц: протонов и нейтронов, составляющих атомное ядро; фотонов, составляющих свечение всего исходящего при расщеплении атомного ядра: нейтрино, мюонов, каонов, глюонов и т. д. (их около сотни).

Таблица 1.1. Частицы и заряды

Частицы	Массы	Электрические заряды, Кл	Примечания
Электрон ⊖	$m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг	$q_e = -e \approx -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл	Масса очень мала. Электрический заряд отрицательный.
Протон ⊕	$m_p \approx 1,6726 \cdot 10^{-31}$ кг	$q_p = +e \approx +1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл	Масса в 1836,15 раз больше массы электрона. Электрический заряд положительный.
Нейтрон ○	$m_n \approx 1,6749 \cdot 10^{-31}$ кг	Электрического заряда нет	Он обеспечивает устойчивость атомных ядер; имеется во всех ядрах, кроме водорода. Масса в 1838,68 раз больше массы электрона.
Фотон ⊙	Массы нет	Электрического заряда нет	Частица света. Перемещается в вакууме со скоростью $c \approx 299\,792$ км/час.

1.1.2. Электростатические силы. Закон Кулона

• **Притяжение и отталкивание двух электрических зарядов** (рис. 1.1).

1. Два заряда одинакового знака отталкиваются.
2. Два заряда противоположных знаков притягиваются.

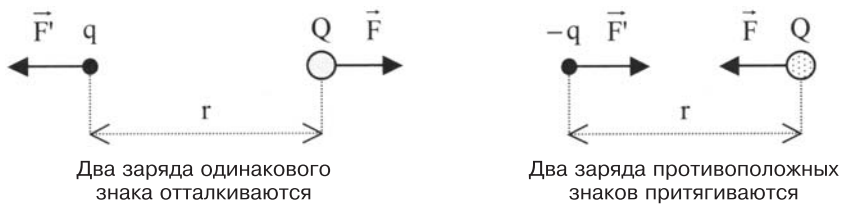


Рис. 1.1. Притяжение и отталкивание двух электрических зарядов

• **Модуль сил притяжения и отталкивания.** Выраженный в ньютонах (Н) он определяется *законом Кулона*:

$$F = F' = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qQ}{r^2} \text{ с единицами измерения Н} = \frac{1}{\Phi/\text{м}} \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{Кл}^2}{\Phi \cdot \text{м}},$$

где ϵ — абсолютная проницаемость среды. В вакууме (и в почти сухом воздухе)

$$\epsilon = \epsilon_0 \approx 8,8541878 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Примечание. Теория распространения электромагнитных волн показывает, что константы ϵ_0 (*электрическая проницаемость вакуума*), μ_0 (*магнитная проницаемость вакуума*) и c (*скорость света в вакууме*) связаны соотношением $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$. С тех пор как скорость света в вакууме стала эталоном, электрическая проницаемость вакуума стала константой, точно определяемой как

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2},$$

где $c = 299\,792\,458$ м/с и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А² (или Гн/м).

1.1.3. Электрическое поле

Сила \vec{F} , действующая на заряд Q , является следствием действия заряда q на расстоянии. Такая интерпретация приводит к новой записи *закона Кулона*:

$$\vec{F} = Q\vec{E} \text{ с единицами измерения } \text{Н} = \text{Кл} \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

где *напряженность* E вектора электрического поля \vec{E} определяется как

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \text{ с единицами измерения } \text{В/м} = \frac{1}{\Phi/\text{м}} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Кл}}{\Phi \cdot \text{м}}.$$

Заряд Q позволяет определить наличие электрического поля (рис. 1.2).

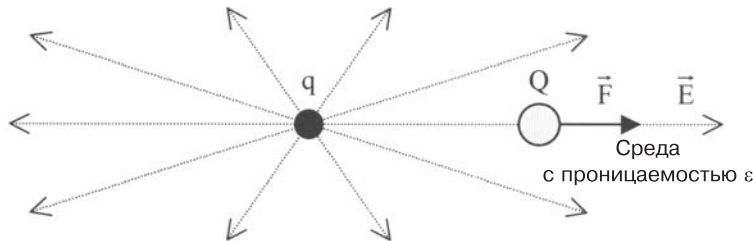


Рис. 1.2. Электрическое поле заряда q

1.2. Явление проводимости. Электрический ток

1.2.1. Электрический ток

• **Электрический ток.** Электрические заряды под воздействием электрического поля испытывают действие электростатических сил, они перемещаются. Поток зарядов через поверхность S называется *электрическим током*. Его обозначают как i , единица измерения — ампер (А).

$$i = \frac{dq}{dt} \text{ с единицами измерения } \text{А} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}}.$$

Примечание. Если поток зарядов постоянен, имеем $I = \Delta Q / \Delta t$.

• **Плотность тока.** Эта фундаментальная величина определяет значение тока через единицу поверхности:

$$J = \frac{I}{S} \text{ с единицами измерения } \text{А/м}^2.$$

Вопрос. Зная, что голый медный проводник выдерживает плотность тока около $J = 5 \text{ А/мм}^2$, выбрать минимальное сечение проводника $S_{\text{мин}}$, необходимое для питания электроплиты, потребляющей номинальный ток $I_{\text{ном}} = 30 \text{ А}$.

Ответ. $S_{\text{мин}} = I_{\text{ном}} / J = 6 \text{ мм}^2$.

• **Скорость зарядов. Закон Ома.** В вакууме под действием электростатических сил заряды достигают обычно скоростей порядка нескольких тысяч м/с (катодные трубки).

Из-за трудностей проложить себе путь между атомами или молекулами в материи носители зарядов, подверженные тепловым колебаниям, быстро достигают очень маленькой предельной скорости в несколько мм/с (в меди). Закон Ома объясняет наличие такой скорости, используя вектор плотности тока \vec{j} .

В микроскопической форме (\vec{j} — вектор плотности тока; σ — проводимость материала):

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \text{ с единицами измерения } \text{А/м}^2 = (\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1})(\text{В/м}).$$

В макроскопической форме (I — ток, U — напряжение на зажимах проводника, ℓ — его длина, S — его сечение, ρ — удельное сопротивление материала):

$$I = SJ = S\sigma E = S\sigma \frac{U}{\ell} = \frac{S\sigma}{\ell} U = \frac{U}{R}.$$

Тогда закон Ома запишется в виде:

$$U = RI$$

$$\text{с единицами измерения } \text{В} = \text{Ом} \cdot \text{А} \text{ при } R = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{S} = \rho \frac{\ell}{S}.$$

Примечание. Чтобы существовал ток I , среда должна обладать свободными зарядами (проводимость σ), подверженными воздействию со стороны поля \vec{E} (рис. 1.3).

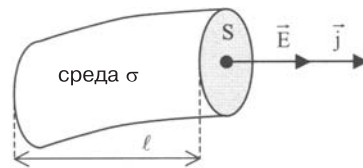


Рис. 1.3. Электрическая проводимость

1.2.2. Свободные и связанные заряды

Атомы (рис. 1.4) представляют собой ядро, окруженное электронным облаком.

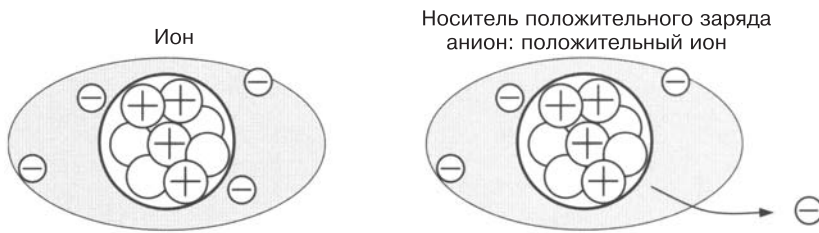


Рис. 1.4. Атом-ион

Чтобы получить электрический заряд, нужно от атома отделить один или несколько электронов. Это может быть реализовано несколькими способами:

1. Посредством внешней энергии.

- Механически — трением, например, воздуха о кузов автомобиля.
- Электрически — сильное электрическое поле может извлечь электрон из атома (диод Зенера).
- Термически — тепловое движение атомов и молекул в газе может вызвать их ионизацию (плазма).

2. Сближением атомов (кристаллы, поликристаллы). Хотя кристаллические решетки обязаны силой своего сцепления объединению их электронов, они не всегда являются проводниками. Различают проводники, полупроводники и изоляторы.

1.2.3. Электрические среды

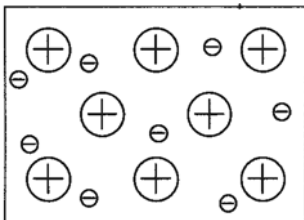


Рис. 1.5. Проводники. Поток свободных электронов в фиксированной ионной решетке

• **Проводники.** Большое количество электронов свободно для перемещения внутри металла (рис. 1.5).

Проводимость металла очень велика. Эта проводимость выражается в функции подвижности μ носителей и их концентрации n .

$$\sigma = ne\mu$$

с единицами измерения

$$\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1} = \frac{1}{\text{м}^3} \text{Кл} \frac{\text{м}^2}{\text{Вс}} = \frac{1 \text{ Кл}}{\text{м Вс}} = \frac{1 \text{ А}}{\text{м В}}$$

Пример 1.2.1. Проводимость меди составляет $\sigma \approx 59 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

• **Полупроводники.** Это монокристаллы высокой чистоты, в которых только некоторые атомы освобождают один электрон при температуре окружающей среды ($T \approx 300 \text{ К}$). Обычно один электрон более чем на 100 миллионов атомов (рис. 1.6). Атомы полупроводниковых кристаллов принадлежат IV колонке периодической таблицы элементов.

Проводимость обеспечивается электронами (отрицательные носители) и положительными ионами одновременно. Ионы при этом как бы перемещаются, поскольку вследствие постоянного теплового движения электроны покидают атом, образуя ион и т. д. Эти положительные ионы называются *дырками* (положительные носители). Проводимость полупроводников представляет собой сумму двух проводимостей:

- Проводимость положительными носителями (слабая) $\sigma_{\text{п}}$: дырки перемещаются труднее, чем электроны.
- Электронная проводимость (более сильная) $\sigma_{\text{е}}$.

По большому счету проводимость намного слабее, чем у металлов, так как носителей зарядов меньше (число положительных зарядов такое же, как и отрицательных).

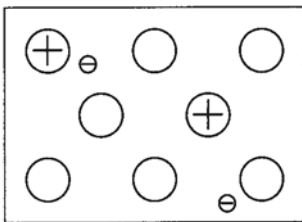


Рис. 1.6. Полупроводник. Свободный электронный и ионный поток в фиксированной атомной решетке

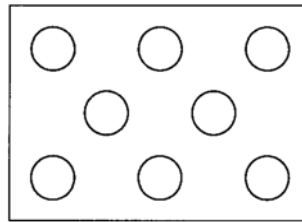


Рис. 1.7. Диэлектрики. Свободный электронов в атомной решетке нет

Вопрос. Для чистого кремния при температуре окружающей среды ($T \approx 300 \text{ К}$) имеем: $\mu_{\text{е}} \approx 0,12 \text{ м}^2/\text{Вс}$, $\mu_{\text{п}} \approx 0,05 \text{ м}^2/\text{Вс}$, $n_{\text{п}} = n_{\text{е}} = n_{\text{i}} \approx 1,5$ носителей/ м^3 . Рассчитать проводимость.

Ответ. $\sigma = \sigma_{\text{е}} + \sigma_{\text{п}} = n_{\text{е}}e\mu_{\text{е}} + n_{\text{п}}e\mu_{\text{п}} \approx 4,08 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

• **Диэлектрики.** В них нет свободных электронов (рис. 1.7) при температуре окружающей среды ($T \approx 300 \text{ К}$). Проводимость практически нулевая.

1.2.4. Влияние температуры

• **Проводники.** Повышение теплового движения с ростом температуры затрудняет движение электрических зарядов. Поэтому с ростом температуры проводимость проводников уменьшается и определяется как

$$\sigma = \sigma_0(1 + \alpha\theta),$$

где σ_0 — проводимость при 0°C ; θ — температура в $^\circ\text{C}$; α — отрицательный температурный коэффициент в $^\circ\text{C}^{-1}$.

• **Полупроводники.** Напротив, в полупроводниковых материалах при температуре окружающей среды тепловое движение имеет иное последствие. Оно создает новые свободные заряды (пары электрон-дырка). Поэтому при средней температуре проявляется свойство, обратное свойству проводников: проводимость повышается экспоненциально с ростом температуры.

- У германия проводимость удваивается примерно каждые 10°C .
- У кремния проводимость удваивается примерно каждые 6°C .

Такое повышение проводимости происходит экспоненциально и преобразует эти полупроводники в проводники приблизительно при 120°C для германия и 200°C для кремния. Диоды, транзисторы и интегральные схемы при этих температурах теряют свои специфические свойства.

1.2.5. Частотные свойства.

Поверхностный эффект в проводнике

При переменном токе электромагнитные явления вытесняют заряды с центра проводника. Это называется *поверхностным эффектом*. Ток в проводнике становится неоднородным. На периферии он больше, чем в центре (рис. 1.8).

Глубина проникновения тока определяется как

$$e = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\mu_r f\sigma}},$$

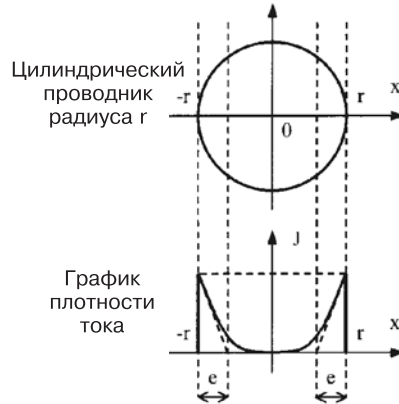
где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума; μ_r — относительная магнитная проницаемость материала (безразмерная); σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ — проводимость материала; f , Гц — частота.

Вопрос. Рассчитать глубину проникновения тока в медном проводнике: ($\sigma \approx 59 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и $\mu_r \approx 1$) при 50 Гц.

Ответ. По формуле $e \approx 9,2$ мм. Для ограничения этого эффекта используют многопроволочные проводники, для передачи энергии используют

многокабельные линии. Кабели высокой надёжности также многопроволочные.

Рис. 1.8. Поверхностный эффект в проводнике

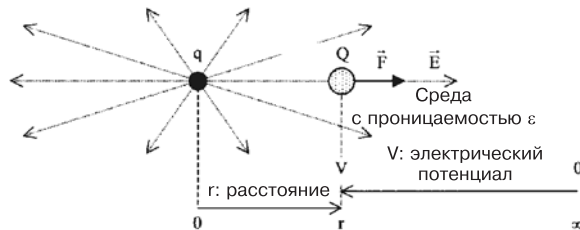


Примечание. С ростом частоты глубина проникновения уменьшается.

1.3. Электрический потенциал заряда

(Развитие темы см. гл. 3)

Рис. 1.9. Электрический потенциал



1.3.1. Цель

Рассматриваемый заряд q (рис. 1.9) создает электрическое поле, вектор напряженности которого \vec{E} . Для упрощения он заменяется скалярной величиной, связанной с работой, которую следует выполнить для переноса пробного заряда Q из бесконечности на расстояние r от рассматриваемого заряда q . Эта величина называется *электрическим потенциалом* и обозначается V .

Примечание. Соответственно определению потенциал на бесконечном расстоянии равен нулю: $V(\infty) = 0$.

1.3.2. Работа при переносе заряда Q на расстояние r от заряда q

Элементарная работа dW при переносе заряда Q из расстояния r в $(r - dr)$. При этом предполагается постоянство силы.

$$dW = -Fdr = -QEdr \text{ с единицами измерения } Дж = Н \cdot м = Кл \frac{В}{м}.$$

Работа $W_{A \rightarrow B}$ при переносе заряда Q из точки A в точку B . Интегрируя в пределах от A до B , получим:

$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B E(r)dr \text{ с единицами измерения } Дж = Кл \frac{В}{м}.$$

Полагая $dV = -E(r)dr$, интеграл запишется в виде:

$$W_{A \rightarrow B} = Q \int_A^B dV = Q(V_B - V_A) \text{ с единицами измерения } Дж = Кл \cdot В.$$

Работа $W_{\infty \rightarrow M}$ при переносе заряда Q из бесконечности на расстояние M .

$$W_{\infty \rightarrow M} = Q \int_{\infty}^M dV = Q(V_M - V_{\infty}) = QV_M$$

с единицами измерения $Дж = Кл \cdot В$.

1.3.3. Электрический потенциал

Из предыдущих результатов следует:

$$V_M = \frac{W_{\infty \rightarrow M}}{Q} \text{ с единицами измерения } В = Дж/Кл.$$

Функция $V_M(r)$ определяет работу при переносе единицы заряда из бесконечности в точку M (рис. 1.10). Величину V_M называют *электрическим потенциалом* точки M , созданным рассматриваемым зарядом q .

Примечания.

- Как только заряд освободится от приложенного к нему возмущения, он, естественно, вернется в бесконечность, затратив накопленную энергию. Его потенциал снизится до нуля.
- Электрический потенциал $V_M(r)$ является величиной, отражающей значение потенциальной энергии, накопленной зарядом Q , когда он располагается на расстоянии r от заряда q . Она не зависит от заряда Q ! Это фундаментальное энергетическое понятие.

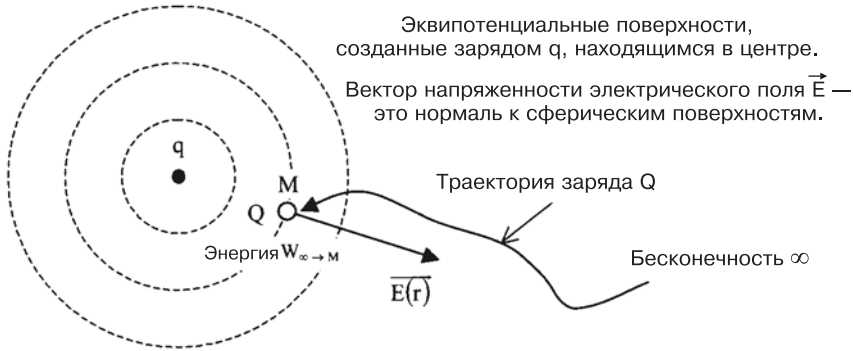


Рис. 1.10. Работа электрической силы

1.3.4. Разность электрических потенциалов. Электрическое напряжение

Протекание тока в цепи может быть только путем энергетического обмена с внешней средой (рис. 1.11). Таким образом, носители зарядов способны передать энергию $Q(V_B - V_A)$ во внешнюю среду. *Напряжение* определяется разностью потенциалов $U_{BA} = V_B - V_A$.

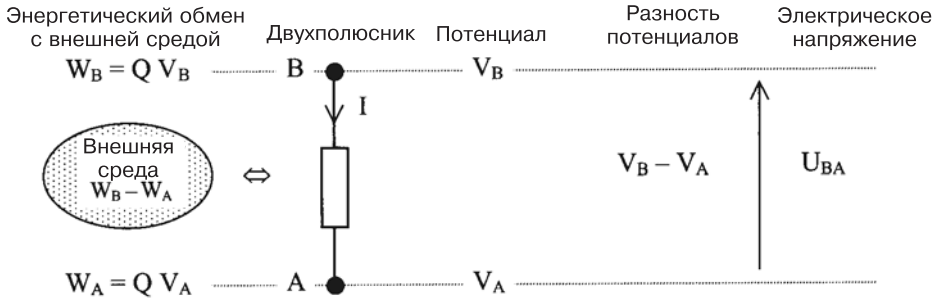


Рис. 1.11. Потенциал — разность потенциалов — напряжение

Примечание. Следует понимать, что при прохождении в электрической цепи носители заряда изменяют свой потенциал (энергию), обычно уменьшая.

ГЛАВА 2

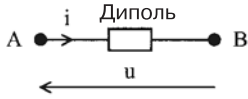
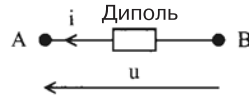
ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

2.1. Двухполюсники

2.1.1. Определение. Условности

Двухполюсник — это приемник или источник электрической энергии, способный преобразовать электрическую энергию в энергию различной природы (химическую, механическую, термическую ...) в режиме потребителя и обратно — в режиме источника. С внешней средой он связан зажимами А и В (табл. 2.1). Ток, входя через один из них, выходит через другой. Напряжение u и ток i — величины алгебраические.

Таблица 2.1. Условные приемник и генератор

Условный приемник	Условный генератор
	
Мощность (потребляемая, преобразуемая) положительна: $ui > 0$	Мощность (генерируемая, выработанная) положительна: $ui > 0$

2.1.2. Линейный двухполюсник. Линейная цепь

• **Линейный двухполюсник.** Двухполюсник, в котором $u = f(i)$, где $i = g(u)$, называется линейным, если, и только если, функция f или g линейна, т. е. такова, что

$$f(\alpha_1 i_1 + \alpha_2 i_2) = \alpha_1 f(i_1) + \alpha_2 f(i_2) \quad \text{или} \quad g(\lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2) = \lambda_1 g(u_1) + \lambda_2 g(u_2).$$

• **Линейная цепь.** Если все двухполюсники, составляющие электрическую цепь, линейны, то уравнение, позволяющее рассчитать выходную величину $s = s(t)$ в функции входной $e = e(t)$, в общем случае является дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами типа:

$$a_n \frac{d^n s}{dt^n} + \dots + a_2 \frac{d^2 s}{dt^2} + a_1 \frac{ds}{dt} + a_0 s = b_m \frac{d^m e}{dt^m} + \dots + b_2 \frac{d^2 e}{dt^2} + b_1 \frac{de}{dt} + b_0 e \quad (m \leq n).$$

Тогда цепь считается линейной.

Пример 2.1.1. Мощность $p = Ri^2$ не линейна, так как наличие квадратной функции является нелинейностью, ее производная dp/dt не является независимой от i .

2.1.3. Элементарные двухполюсники

а) Классификация двухполюсников

Активный двухполюсник — это двухполюсник, способный генерировать энергию. И напротив, *пассивный* двухполюсник не способен генерировать энергию.

Двухполюсник *симметричен*, когда

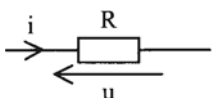
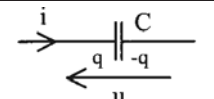
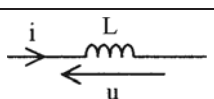
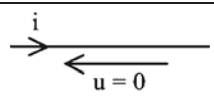
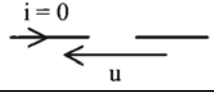
$$f(i) = -f(-i) \quad \text{или} \quad g(u) = -g(-u).$$

Линейный двухполюсник: см. § 2.1.2.

б) Пассивные двухполюсники

Пассивные линейные элементы (табл. 2.2). Обычно принимается соглашение приемника (направления u и i встречные), что исключает ошибки.

Таблица 2.2. Пассивные линейные двухполюсники в режиме потребителя

Элемент	Обозначение на схемах	Символ и размерность	Закон	Единицы измерения
Сопروتивление (резистор)		R — сопротивление в омах (Ом)	$u = iR$	$B = \text{Ом} \cdot \text{А}$
Конденсатор		C — емкость в фарадах (Ф)	$i = C \frac{du}{dt}$	$A = \Phi \frac{B}{c}$
Катушка индуктивности		L — индуктивность в генри (Гн)	$u = L \frac{di}{dt}$	$B = \Gamma_n \frac{A}{c}$
Короткое замыкание			$\forall i, u = 0$	
Разрыв цепи			$\forall u, i = 0$	

Примечания.

- Согласно закону прохождения тока i в конденсаторе в течение времени dt вызывает изменение электрического напряжения, направленного встречно. Этот закон записывается в интегральной форме как

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i d\tau = \frac{1}{C} \int_0^t i d\tau + U_0, \quad \text{где } U_0 = u \quad (t = 0).$$

- Согласно закону изменение тока i в линейной катушке индуктивности не происходит скачком. Изменение тока сопровождается появлением встречно направленного ему напряжения, препятствующего изменению тока. Это закон Ленца, который записывается в интегральной форме как

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\tau = \frac{1}{L} \int_0^t u d\tau + I_0, \quad \text{где } I_0 = i \quad (t = 0).$$

- Энергетический аспект (см. гл. 12 и гл. 13).

• *Пассивные нелинейные элементы.*

Пример 2.1.2. Зависящее от напряжения сопротивление не является линейным двухполюсником. Описывающее его уравнение $i = ku^n$ не является линейной функцией напряжения u , а его производная di/du зависит от напряжения u .

Диод (см. гл. 16) не является линейным двухполюсником. Описывающее его уравнение

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{u_D}{N U_T}} - 1 \right)$$

не является линейной функцией напряжения u_D .

в) Активные двухполюсники

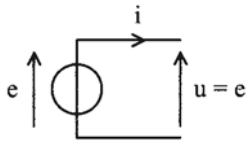
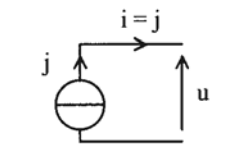
• *Источники* (табл. 2.3). Договоренность о режиме генератора или потребителя принимается в зависимости от рассматриваемой задачи.

Примечание. Условные обозначения (табл. 2.3), используемые в эквивалентных схемах, всегда соответствуют «идеальным», а не «реальным» источникам. Часто реальный источник может быть смоделирован идеальным источником напряжения с последовательно включенным резистором. Это модель Тевенена. Его можно также смоделировать идеальным источником тока с параллельно включенным резистором. Это модель Нортона (см. § 2.2.4).

Пример 2.1.3. Автомобильная батарея является типичным примером «почти идеального» источника напряжения. Ее накапливаемый заряд измеряется обычно в ампер-часах (А · час). Таким образом, батарея на 12 В,

способная накопить заряд в $60 \text{ А} \cdot \text{час}$, может выдавать ток 10 А в течение 6 часов при напряжении 12 В .

Таблица 2.3. Источники

	Обозначение	Символ и размерность	Закон
Источник напряжения		e — электродвижущая сила (ЭДС) u — напряжение в вольтах (В)	$\forall i, u = e$
Источник тока		j — ток в амперах (А)	$\forall u, i = j$

Вопрос. Рассчитать энергию, поставляемую батареей в предыдущем примере.

Ответ. $W = UIt = 12 \cdot 60 \cdot 3600 = 2592 \text{ кДж}$.

Примечание. Практически «идеальных» источников тока не существует. Действительно, это предполагало бы, что можно накапливать энергию в форме тока постоянного значения j . Однако источник неизменного тока можно реализовать соединением источников энергии и двухполюсников. Это транзистор, соединенный с источником напряжения, или фотодиод, освещенный источником световой энергии.

• **Управляемый и неуправляемый источник.** *Управляемый*, или *зависимый, источник* — это источник, выходная величина которого зависит от другой величины схемы. В противном случае источник называется *неуправляемым* или *независимым*.

Пример 2.1.4. Выходной ток транзистора зависит от входной величины: тока базы биполярного транзистора и от напряжения решетка-источник полевого транзистора (рис. 2.1).

• **Линейный и нелинейный управляемый источник.** В *линейном управляемом источнике* выходная величина линейно зависит от управляющей величины. Если нет, источник *не линеен*.

2.1.4. Принципиальные ограничения использования двухполюсника

Принципиальными электрическими и тепловыми ограничениями использования двухполюсников являются максимальное напряжение, максималь-

ный ток и максимальная мощность. Эти ограничения зависят от режима, который может быть: продолжительным, переменным, импульсным повторяющимся, импульсным неповторяющимся и т. д.

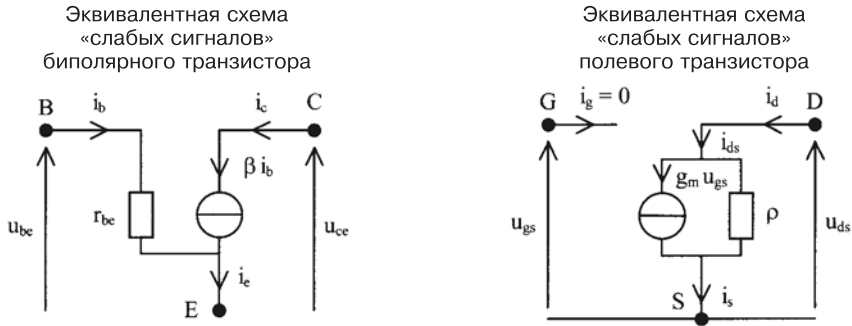


Рис. 2.1. Примеры управляемых источников

2.1.5. Характеристика двухполюсника

В зависимости от обстоятельств характеристика двухполюсника может быть снята в установившемся режиме (статическая характеристика), в переходном, импульсном режиме (динамическая характеристика) и т. д.

Пример 2.1.5. Здесь двухполюсник является только потребителем, так как потребляемая мощность может быть только положительной (рис. 2.2).

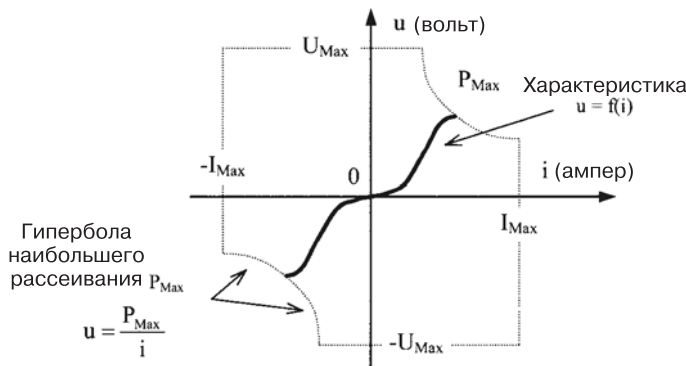
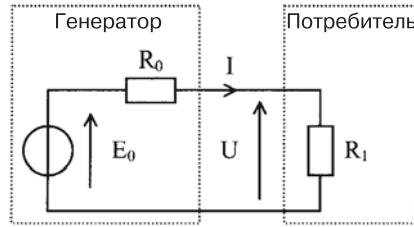


Рис. 2.2. Пример характеристики двухполюсника

2.1.6. Рабочая точка двухполюсника

Пример 2.1.6. Питание двухполюсника потребителем двухполюсником генератором фиксирует рабочую точку (рис. 2.3)

Рис. 2.3. Питание потребителя генератором

**Метод**

Рабочая точка определяется пересечением характеристик двухполюсников генератора и потребителя. Ее координатами являются напряжение на зажимах двухполюсников и ток I , протекающий в них.

1) Согласно общему подходу (линейные или нелинейные двухполюсники) нужно начертить характеристики в общей системе координат (рис. 2.4) или прибегнуть к методам информатики (например, моделированию).

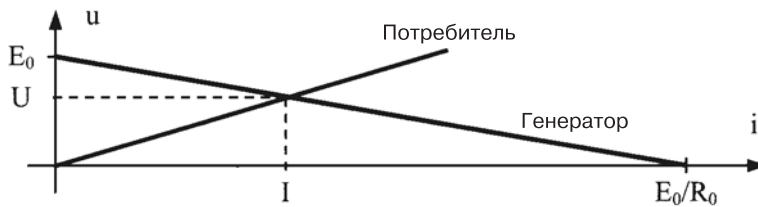


Рис. 2.4. Характеристики (пример на рис. 2.3)

2) Если двухполюсники потребителя и генератора линейны (как это имеет место на рис. 2.3 и 2.4), то решением проблемы будут:

- Уравнение генератора, называемое *уравнением прямой нагрузки*: $u = E_0 - R_0 i$.
- Уравнение потребителя: $u = R_1 i$.
- Система:
$$\begin{cases} U = E_0 - R_0 I, \\ U = R_1 I, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U = \frac{R_1 E_0}{R_0 + R_1}, \\ I = \frac{E_0}{R_0 + R_1}. \end{cases}$$

2.1.7. Соединение двухполюсников**а) Последовательное соединение двухполюсников (рис. 2.5)**

Пример 2.1.7. См. гл. 5, 11, 12, 13.

Метод

При последовательном соединении двухполюсников по ним протекает один и тот же ток. Закон контурных токов позволяет записать

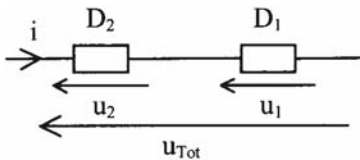


Рис. 2.5. Последовательное соединение

$$u_{Tot} = u_1 + u_2.$$

1) Обобщенным подходом (при линейных или нелинейных двухполюсниках) поэтапно получим характеристику эквивалентного двухполюсника

$$\begin{cases} u_1 = f_1(i), \\ u_2 = f_2(i), \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u_{Tot} = u_1 + u_2 = f_1(i) + f_2(i).$$

2) При линейных двухполюсниках эквивалентный двухполюсник также линейный.

Тогда можно составить уравнение характеристики эквивалентного двухполюсника.

б) Параллельное соединение двух двухполюсников (рис. 2.6)

Метод

При параллельном соединении двухполюсников они питаются одним и тем же напряжением. По закону узлов

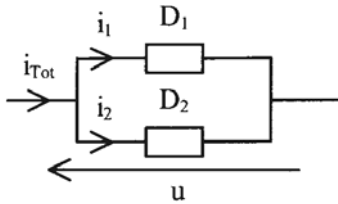


Рис. 2.6. Параллельное соединение

$$i_{Tot} = i_1 + i_2.$$

1) Обобщенным подходом (при линейных или нелинейных двухполюсниках) поэтапно получим характеристику эквивалентного двухполюсника

$$\begin{cases} i_1 = g_1(u), \\ i_2 = g_2(u), \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{Tot} = i_1 + i_2 = g_1(u) + g_2(u).$$

2) При линейных двухполюсниках эквивалентный двухполюсник также линейный.

Тогда можно составить уравнение характеристики эквивалентного двухполюсника.

Примечание. Часто записью $D_1 // D_2$ обозначают параллельное соединение двух двухполюсников D_1 и D_2 .

Пример 2.1.8. См. гл. 5, 11, 12, 13.

2.2. Теоремы об электрических цепях

Следующие далее законы и теоремы приводятся для мгновенных значений переменных. Они могут быть обобщены в области использования комплексных чисел (см. гл. 5).

- Эти обобщения позволяют рассматривать все двухполюсники как линейные согласно определению (см. § 2.1.3), включая конденсаторы, катушки и т. д.
- Практически эти обобщения осуществляются в законах и теоремах заменой сопротивлений полными комплексными (комплексные числа) или операторными (преобразование Лапласа) сопротивлениями, а проводимостей — полными комплексными или операторными проводимостями. Соответственно теоремам будут приняты и замечания.

2.2.1. Законы Кирхгофа

Внимание! Токи и напряжения являются алгебраическими величинами. Положительные направления напряжения и тока, будучи неопределенным *априори*, задаются произвольно. Отрицательный результат просто указывает, что реальные направления тока или напряжения противоположны указанным стрелками на расчетной схеме.

• **Закон узлов**¹. Его можно привести в двух эквивалентных формулировках.

1) Сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, отходящих от узла.

$$\sum i_{(\text{приходящих к узлу})} = \sum i_{(\text{отходящих от узла})}.$$

2) Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

Правило (произвольное) принятия знака: Знак «+» присваивается приходящим к узлу токам, а знак «−» отходящим от узла.

$$\sum i_n \text{ (в узле) } = 0.$$

Вопрос. Записать закон узлов для узла N (рис. 2.7).

Ответ. $i_1 + i_2 = i_3$ или $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.

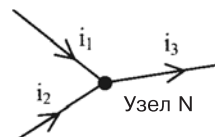


Рис. 2.7. Узел N

• **Закон контуров.** Его можно привести в двух эквивалентных формулировках.

¹Во многих источниках закон узлов называют первым законом Кирхгофа, а закон контуров — вторым законом Кирхгофа. — *Прим. перев.*

1) Сумма напряжений в направлении обхода контура равна сумме напряжений в противоположном направлении.

$$\sum u_{(\text{направление обхода})} = \sum u_{(\text{встречное направление})}.$$

2) Алгебраическая сумма напряжений в контуре равна нулю.

$$\sum u_n (\text{в контуре}) = 0.$$

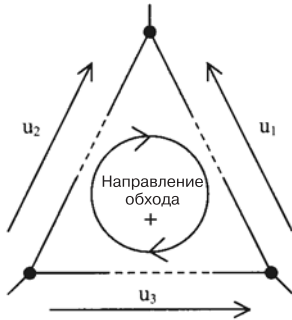


Рис. 2.8. Контур М

Правило (произвольное) принятия знака: знак «+» присваивается напряжениям, направление которых соответствует направлению обхода контура, а знак «-» соответствует встречному направлению.

Вопрос. Записать закон контуров для контура М (рис. 2.8).

Ответ. $u_2 = u_1 + u_3$ или $u_2 + (-u_1) + (-u_3) = 0$.

Метод

Обычно начинают с выбора направления обхода контура.

Внимание! Законы узлов и законы контуров идентичны по своей форме, как *сумма мгновенных значений переменных*. Соответственно, и в случае периодических переменных эти законы справедливы также для средних значений переменных, **НО НЕ** для действующих значений и **НЕ** для максимальных и минимальных значений.

Пример 2.2.9. Для узла N (рис. 2.7) можно записать: $I_1_{cp} + I_2_{cp} = I_3_{cp}$.

2.2.2. Пассивирование (компенсация) источника

Метод

В общем случае «реальный» источник энергии может быть заменен его внутренним пассивным сопротивлением. В случае «идеальных» источников (см. § 2.1.3) пассивирование состоит в замене источника напряжения коротким замыканием, а источника тока — разрывом цепи.

2.2.3. Теорема суперпозиции

Эта теорема вытекает непосредственно из свойства линейности активных и пассивных двухполюсников. Рассмотрим ее сначала для токов, затем для напряжений.

1. В линейной системе ток в ветви — это алгебраическая сумма токов, каждый из которых вызван каждым независимым, отдельно взятым источником при условии, что при рассмотрении одного источника остальные считаются пассивными.
2. В линейной системе напряжение между двумя зажимами — это алгебраическая сумма напряжений между этими зажимами, каждое из которых вызвано каждым из отдельно взятых имеющихся в системе независимых источников при условии, что при рассмотрении одного источника остальные считаются пассивными.

Внимание! Управляемые источники не должны считаться пассивными.

Вопрос. Имеем схему с двумя источниками (рис. 2.9). Определить напряжение u и ток i .

Ответ. 1) Пассивирован источник 2

(рис. 2.9)

$$u_1 = \frac{R_2 R_L e_1}{R_2 R_L + R_1 (R_2 + R_L)}$$

и

$$i_1 = \frac{R_2 e_1}{R_2 R_L + R_1 (R_2 + R_L)}.$$

2) Пассивирован источник 1 (рис. 2.10)

$$u_2 = \frac{R_1 R_L e_2}{R_1 R_L + R_2 (R_1 + R_L)}$$

и

$$i_2 = \frac{R_1 e_2}{R_1 R_L + R_2 (R_1 + R_L)}.$$

3) Следует (рис. 2.10):

$$u = u_1 + u_2 = \frac{R_L (R_2 e_1 + R_1 e_2)}{R_1 R_2 + R_L (R_2 + R_1)} \quad \text{и} \quad i = i_1 + i_2 = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 R_2 + R_L (R_2 + R_1)}.$$

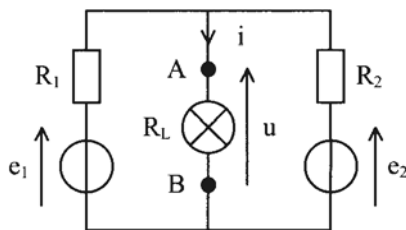


Рис. 2.9. Схема с двумя источниками

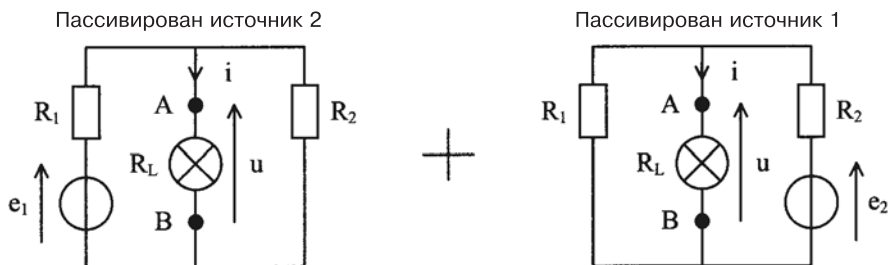


Рис. 2.10. Суперпозиция двух состояний в схеме с двумя источниками

2.2.4. Теоремы Тевенена и Нортонa

Весь активный линейный двухполюсник АВ, состоящий из сопротивлений, независимых и/или управляемых источников (см. § 2.2.3), может быть представлен (рис. 2.11):

1) Последовательной эквивалентной схемой (модель Тевенена), содержащей источник напряжения e_0 и сопротивление R_0 .

2) Параллельной эквивалентной схемой (модель Нортонa), содержащей источник тока i_0 и сопротивление R_0 .

Здесь: e_0 — напряжение холостого хода двухполюсника АВ, т.е. напряжение при отсутствии нагрузки между зажимами АВ, $e_0 = u$ при $i = 0$; i_0 — ток короткого замыкания двухполюсника АВ, т.е. ток между замкнутыми накоротко зажимами А и В, $i_0 = i$ при $u = 0$; R_0 — сопротивление со стороны зажимов АВ, равное эквивалентному, когда неуправляемые источники принимаются пассивными.

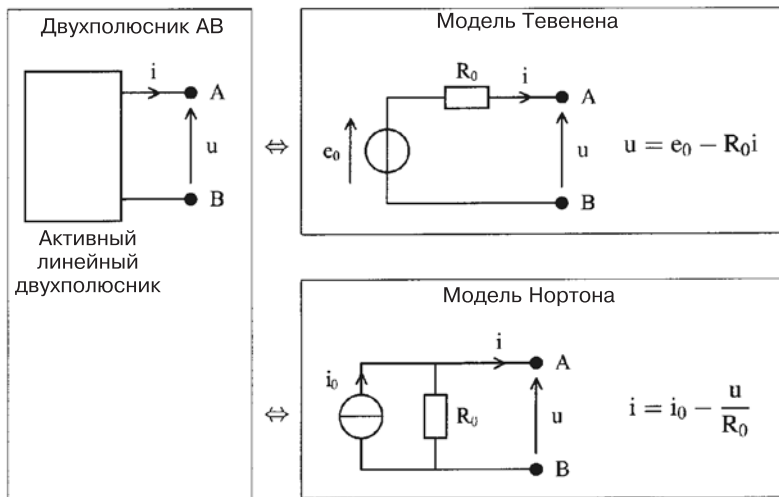


Рис. 2.11. Модели двухполюсника Тевенена и Нортонa

Метод

Модели Тевенена и Нортонa эквивалентны: то же напряжение u и тот же ток i для заданной нагрузки. Переход от одного к другому осуществляется соотношением:

$$e_0 = R_0 i_0.$$

Внимание! Для определения R_0 принимаются пассивными только неуправляемые источники (независимые). Управляемые источники (зависимые) не должны приниматься пассивными.

Примечание. Модели Тевенена и Нортона эквивалентны только для внешних устройств. Они не учитывают рассеиваемую реальными цепями, замещенными моделями, мощность. Чтобы это показать, достаточно отметить, что на холостом ходу модель Тевенена мощность не рассеивает.

Метод

Первым действием должно быть выделение двухполюсника, эквивалентная модель которого ищется, и «отсоединить» нагрузку.

Вопрос. Построить модели Тевенена и Нортона ранее рассмотренных электрических схем (см. рис. 2.9).

Ответ. 1) Выражение e_0 (рис. 2.12). Это напряжение холостого хода

$$e_0 = u \quad \text{при} \quad i = 0 \quad \Rightarrow \quad e_0 = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 + R_2}.$$

2) Выражение i_0 (рис. 2.13). Это ток короткого замыкания

$$i_0 = i \quad \text{при} \quad u = 0 \quad \Rightarrow \quad i_0 = \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2}.$$

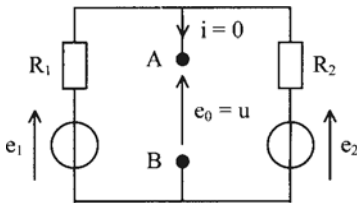


Рис. 2.12. Схема с двумя источниками. Выражение e_0

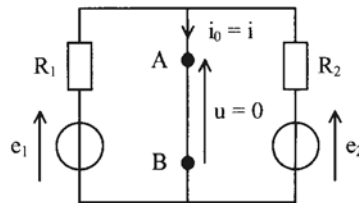


Рис. 2.13. Схема с двумя источниками. Выражение i_0

3) Выражение R_0 (рис. 2.14). Сопротивление между зажимами АВ. Источники неуправляемые, приняты пассивными.

$$R_0 = \frac{u}{-i} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

4) Выражение u и i : Принимаем эквивалентную схему Тевенена или Нортона (рис. 2.15) и добавляем нагрузку. Затем из одной и из другой схем получаем:

$$u = \frac{R_L e_0}{R_0 + R_L} \quad \text{и} \quad i = \frac{R_0 i_0}{R_0 + R_L}$$

$$\text{при} \quad e_0 = R_0 i_0 \frac{1}{2}.$$

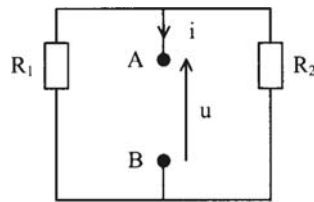


Рис. 2.14. Схема с двумя источниками. Выражение R_0

Окончательно:

$$u = \frac{R_L(R_2 e_1 + R_1 e_2)}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)} \quad \text{и} \quad i = \frac{u}{R_L} = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)}.$$

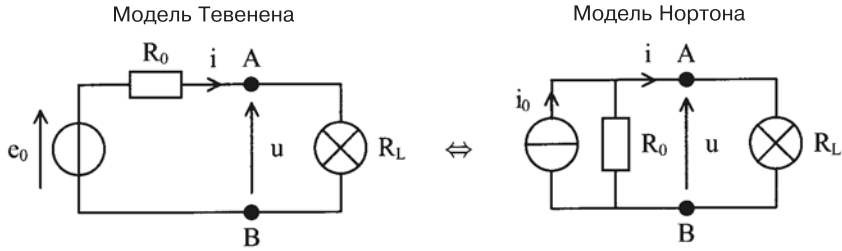


Рис. 2.15. Схема с двумя источниками. Эквивалентная схема с нагрузкой

Вопрос. Имеем схему псевдоинтегратора RC (рис. 2.16) в представлении Лапласа (см. гл. 10).

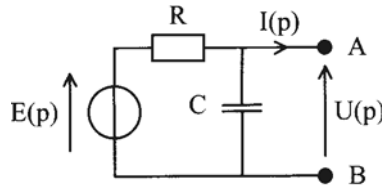


Рис. 2.16. Схема псевдоинтегратора RC

Ответ. Применив теоремы, получим:

$$E_0(p) = \frac{1}{1 + RC_p} E(p) \quad \text{и} \quad I_0 = \frac{E(p)}{R},$$

$$Z_0(p) = R // \frac{1}{C_p} = \frac{r}{1 + RC_p} \quad \text{и} \quad E_0(p) = Z_0(p) I_0(p).$$

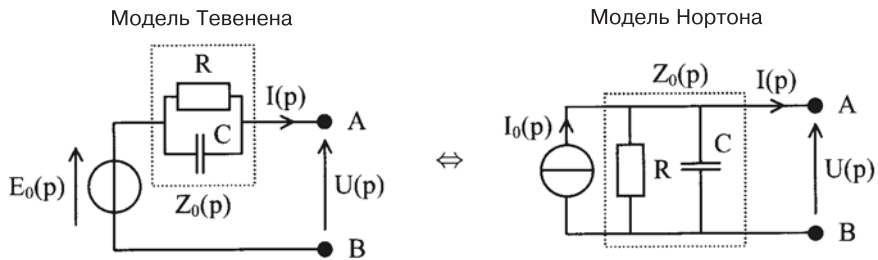


Рис. 2.17. Эквивалентные схемы псевдоинтегратора RC

2.2.5. Теорема Миллмана

При независимых источниках e_1, \dots, e_N двухполюсники (рис. 2.18) эквивалентны.

$$e_0 = \frac{\sum_{k=1}^N e_k G_k}{\sum_{k=1}^N G_k} = \frac{\sum_{k=1}^N e_k G_k}{G_0} \quad \text{и} \quad G_0 = \sum_{k=1}^N G_k,$$

где $G_k = \frac{1}{R_k}$ — проводимость.

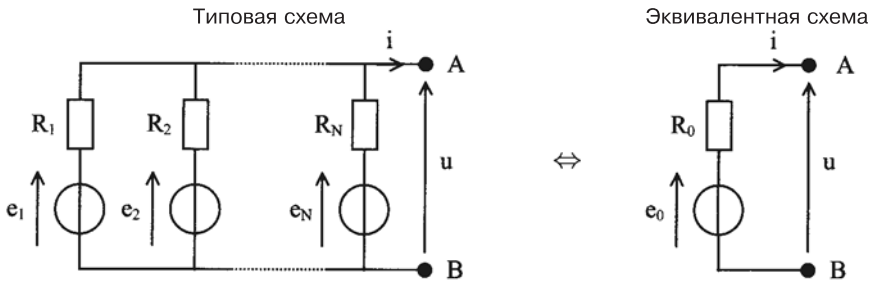


Рис. 2.18. Иллюстрация теоремы Миллмана

При $N = 3$ получим:

$$e_0 = \frac{e_1 G_1 + e_2 G_2 + e_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3} \quad \text{и} \quad G_0 = G_1 + G_2 + G_3.$$

Вопрос. Выразить напряжение u и ток i в ранее рассмотренной схеме (см. рис. 2.9).

Ответ. Возможны два подхода.

Полагаем, что нагрузка не входит в состав двухполюсника. Тогда выбираем эквивалентную схему по модели Тевенена (рис. 2.15). Получаем:

$$e_0 = \frac{\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 + R_2} \quad \text{и} \quad G_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Затем находятся выражения напряжения u и тока i .

Полагаем, что нагрузка входит в состав двухполюсника. Тогда эта теорема позволяет прямо рассчитать напряжение u и затем ток i .

$$e_0 = \frac{\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{0}{R_L}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_L}} = \frac{R_L(R_2 e_1 + R_1 e_2)}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)} \quad \text{и} \quad i = \frac{u}{R_L}.$$

Внимание! В знаменателе ветвь без источника забывать не следует.

2.2.6. Делитель напряжения. Делитель тока

Эти две схемы очень важны (табл. 2.4)

Таблица 2.4. Делитель напряжения. Делитель тока

	Схема	Соотношения
Делитель напряжения		$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_0$ $u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_0$
Делитель тока		$i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_0$ $i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_0$

Внимание! Приведенные формулы (табл. 2.4) справедливы только в случае, когда никакая внешняя нагрузка схему не изменяет.

2.2.7. Теорема Кеннели. Преобразования треугольник-звезда и звезда-треугольник (эквивалентность схем звезда и треугольник)

Теорема Кеннели позволяет перейти от схемы треугольник (Π-образная схема) к схеме звезда (Т-образная схема) и обратно (табл. 2.5).

Таблица 2.5. К вопросу эквивалентности схем звезда и треугольник

Схема звезда (Т-схема)	Схема треугольник (Π-схема)

Имеем соотношения:

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{AC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}; \quad R_B = \frac{R_{AB}R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}};$$

$$R_C = \frac{R_{AC}R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}.$$

$$\begin{aligned}G_{AB} &= \frac{G_A G_B}{G_A + G_B + G_C}; & G_{AC} &= \frac{G_A G_C}{G_A + G_B + G_C}; \\G_{BC} &= \frac{G_C G_B}{G_A + G_B + G_C}. \\R_{AB} &= \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_C}; & R_{AC} &= \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_B}; \\R_{BC} &= \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_A}.\end{aligned}$$

2.2.8. Принцип линейности

В линейной цепи реакция сигнала $s(t)$ представляет собой алгебраическую сумму реакций от каждого отдельно взятого источника (зависимого или нет) при условии пассивности остальных источников. Реализация возможна двумя способами:

1) Суммируем только отклики от каждого независимого источника (но не от управляемых) при пассивности остальных независимых (но не управляемых) источников. Затем используем теорему суперпозиции (см. § 2.2.3).

2) Суммируем все отклики от каждого источника, включая управляемые, все остальные источники, в том числе и управляемые, считаем пассивными. Сигнал отклика сигнала $s(t)$ мы не получаем непосредственно, так как в выражение входят управляемые источники. Они неизвестны, поскольку зависят от других источников. Следует из полученного выражения исключить управляемые (зависимые) источники.