
ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть третья. ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ И МАГНИТОВ К ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРАМ, ТРАНЗИСТОРАМ И КАНАЛАМ СВЯЗИ	19
40. Введение в электрические цепи	20
Символьные обозначения электрических компонентов	20
Блок-схемы электрических/электронных систем	20
Электрический ток и количество электричества	22
Электрический потенциал и ЭДС	23
Сопротивление и проводимость	24
Основные электроизмерительные приборы	25
Линейные и нелинейные компоненты электрических схем	25
Закон Ома	26
Множители и делители	27
Проводники и изоляторы	27
Электрическая мощность	28
Электроэнергия	28
Основные эффекты электрического тока	29
Предохранители	29
41. Электрическое сопротивление материалов	31
Сопротивление и удельное сопротивление	31
Температурный коэффициент сопротивления	32
Цветовое кодирование резисторов и их омические значения	34
Цветовой код для постоянных резисторов	34
Буквенный и цифровой код для резисторов	35
42. Химические эффекты электричества	36
Электролиз	36
Электролитическое осаждение	36
Гальванический элемент	37
Поляризация	38
Саморазряд	38
Свойства электродных пар	38
Коррозия	39
ЭДС и внутреннее сопротивление гальванического элемента ..	39
Первичные элементы	41
Элемент Лекланше	42
Ртутный элемент	42

Вторичные элементы.....	42
Кислотный аккумулятор	43
Щелочной аккумулятор	44
Ёмкость гальванического элемента.....	45
43. Последовательные и параллельные цепи	47
Последовательные цепи	47
Делитель напряжения	48
Параллельные цепи	49
Распределение тока	50
Лампы накаливания в последовательном и параллельном включении	52
Последовательное соединение.....	52
Параллельное соединение.....	53
44. Ёмкость и конденсаторы	54
Электростатическое поле	54
Напряжённость электрического поля	55
Ёмкость.....	56
Конденсаторы.....	57
Плотность электрического потока	57
Диэлектрическая проницаемость	58
Плоский конденсатор	59
Последовательно и параллельно соединённые конденсаторы	60
Конденсаторы, соединённые параллельно	60
Конденсаторы, соединённые последовательно	62
Электрическая прочность	64
Энергия заряженного конденсатора.....	65
Конструкции конденсаторов	65
Разрядка конденсаторов.....	68
45. Магнитные цепи	69
Магнитные поля.....	69
Магнитный поток и плотность потока.....	70
Магнитодвижущая сила и напряжённость магнитного поля... ..	71
Магнитная проницаемость и кривые намагничивания.....	72
Магнитное сопротивление.....	74
Комбинированные последовательные магнитные цепи	74
Аналогия между электрическими и магнитными величинами	75
Гистерезис и потери на гистерезис	75
Гистерезисная петля	75
Потери на гистерезис	76
Потери на вихревые токи	79
Графический метод определения потерь на гистерезис и вихревые токи	81

46. Магнитные материалы	83
Магнитные свойства материалов	83
Диамагнетизм и парамагнетизм.....	83
Ферромагнетизм и ферромагнитные материалы	84
Непостоянные магнитные материалы.....	86
Сплав кремний—железо.....	86
Железоникелевый сплав	88
Порошковый сердечник.....	88
Ферриты.....	89
Постоянные магнитные материалы	89
47. Электромагнетизм	91
Магнитное поле электрического тока	91
Электромагниты.....	93
Электрический звонок	94
Реле	94
Подъёмные магниты	95
Телефонный аппарат	96
Проводник с током в магнитном поле	96
Сила, действующая на проводник.....	96
Громкоговоритель.....	97
Правило левой руки	98
Принцип работы простейшего электродвигателя постоянного тока.....	99
Принцип работы магнитоэлектрических измерительных приборов.....	100
Сила, действующая на заряд.....	101
48. Электромагнитная индукция и индуктивность	103
Электромагнитная индукция.....	103
Законы электромагнитной индукции	104
Индуктивность	106
Катушки индуктивности.....	107
Энергия, запасённая катушкой индуктивности	108
Индуктивность катушки	109
49. Магнитосвязанные контуры	110
Взаимная индуктивность	110
Коэффициент связи	111
Катушки индуктивности, соединённые последовательно	112
Связанные контуры.....	113
Вторичная обмотка без нагрузки	114
Вторичная обмотка с нагрузкой.....	115
Резонанс с подстроечным конденсатором	117
Правило точки для связанных контуров	118

50. Электрические измерительные приборы и измерения	121
Аналоговые измерительные приборы	121
Электромагнитные измерительные приборы.....	122
Выпрямительные детекторные приборы.....	123
Магнитоэлектрические измерительные приборы.....	123
Сравнение измерительных приборов	124
Шунтирующие и балластные резисторы	125
Электронные измерительные приборы.....	126
Омметр	127
Универсальные измерительные приборы.....	128
Ваттметры	128
Эффект «нагрузки»	129
Электронно-лучевой осциллограф	129
Децибелы (отношения логарифмов)	132
Нулевой метод измерений	134
Мост сопротивлений Уитстона.....	135
Потенциометр постоянного тока	135
Куметр (измеритель добротности).....	136
Ошибки измерений	137
Ошибки в пределах применимости прибора.....	137
Ошибки оператора.....	137
Ошибки из-за вносящего помехи измерительного прибора	138
51. Полупроводниковые диоды	139
Проводники, полупроводники, изоляторы.....	139
Кремний и германий.....	140
Материалы <i>n</i> - и <i>p</i> -типа	140
<i>p-n</i> -переход	141
Прямое и обратное смещение.....	143
Полупроводниковые диоды	145
Выпрямитель переменного тока	146
52. Транзисторы	148
Биполярный транзистор	148
Принцип работы транзистора.....	150
Обозначения транзисторов в схемах	152
Схемы включения транзисторов.....	152
Рабочие характеристики транзисторов	153
Схема с общей базой.....	153
Схема с общим эмиттером	154
Методика получения характеристик транзистора	155
Транзистор как усилитель	156
Усилитель с общей базой.....	156

Усилитель с общим эмиттером.....	157
Линия нагрузки	160
Коэффициенты усиления по току и напряжению	163
Тепловой проб'ой и способы его предотвращения	164
Способ первый	165
Способ второй	166
53. Теория цепей постоянного тока.....	167
Введение	167
Законы Кирхгофа	167
Принцип суперпозиции	170
Предварительный анализ цепей постоянного тока	172
Теорема Тевенина—Гельмгольца.....	176
Генератор неизменяющегося постоянного тока	178
Теорема Нортона	179
Эквивалентные схемы Тевенина и Нортона	180
Теорема о максимуме отдаваемой мощности.....	182
54. Переменный ток и напряжение переменного тока.....	184
Введение	184
Генератор переменного тока	184
Форма сигналов переменного тока	185
Величины переменного тока	186
Уравнение гармонической волны.....	189
Сложение и вычитание синусоидальных величин.....	191
Выпрямление переменного тока	193
55. Однофазные последовательные цепи переменного тока	194
Цепь переменного тока с чисто активным сопротивлением	194
Цепь переменного тока с чисто индуктивным сопротивлением	194
Цепь переменного тока с чисто ёмкостным сопротивлением	195
Последовательные $R-L$ цепи переменного тока	196
Последовательные $R-C$ цепи переменного тока	198
Последовательные $R-L-C$ цепи переменного тока.....	200
Последовательно соединённые импедансы	201
Резонанс последовательного контура.....	202
Добротность.....	204
Полоса частот	205
Избирательность резонансного контура	206
Мощность цепей переменного тока	206
Треугольник мощностей и коэффициент мощности.....	208
56. Однофазные параллельные цепи переменного тока	210
Введение	210

<i>R-L</i> параллельная цепь переменного тока	210
<i>R-C</i> параллельная цепь переменного тока.....	212
<i>L-C</i> параллельная цепь	213
<i>L-R-C</i> параллельная цепь переменного тока.....	214
Параллельный резонанс и добротность	218
Параллельный резонанс	218
Резонансная частота	218
Резонансное сопротивление	219
Заграждающий фильтр	219
Добротность.....	219
57. Переходные процессы в цепях постоянного тока	221
Введение	221
Зарядка конденсатора	221
Постоянная времени для <i>R-C</i> цепи.....	223
Кривые переходного процесса <i>R-C</i> цепи.....	223
Разрядка конденсатора.....	226
Рост силы тока в <i>L-R</i> цепи	228
Постоянная времени <i>L-R</i> цепи	230
Кривые переходного процесса <i>L-R</i> цепи.....	230
Спад тока в <i>L-R</i> цепи.....	231
Переключаемые индуктивные цепи	233
Влияние постоянной времени на сигнал прямоугольной формы	234
Интегрирующая цепь	234
Дифференцирующая цепь.....	235
58. Операционные усилители	236
Введение	236
Передающая характеристика	237
Отрицательная обратная связь.....	238
Ширина полосы частот	238
Некоторые параметры ОУ	239
Входной ток	239
Разность входных токов	239
Входное напряжение смещения.....	239
Коэффициент ослабления синфазного сигнала	239
Скорость нарастания выходного напряжения	240
ОУ в качестве инвертирующего усилителя.....	240
Коэффициент усиления	241
Входной импеданс	242
ОУ в качестве неинвертирующего усилителя	243
Коэффициент усиления	243
Входной импеданс	244
ОУ в качестве повторителя напряжения	244

ОУ в качестве сумматора	245
ОУ в качестве компаратора напряжений.....	247
Светочувствительная схема сигнализации.....	248
ОУ в качестве интегратора	249
ОУ в качестве дифференциального усилителя.....	251
Цифро-аналоговое преобразование	252
Аналогово-цифровое преобразование	255
59. Трёхфазные системы.....	257
Введение	257
Трёхфазные источники тока	257
Соединение звездой	259
Соединение треугольником	261
Соединение звездой	264
Соединение треугольником	264
Мощность в трёхфазных системах.....	263
Измерение мощности в трёхфазных системах.....	265
Метод с одним ваттметром для симметричной нагрузки	265
Метод с двумя ваттметрами для симметричных и несимметричных нагрузок.....	265
Метод с тремя ваттметрами для трёхфазной четырёхпроводной системы для симметричной и несимметричной нагрузки	266
Сравнение соединений нагрузок звездой и треугольником...	267
Преимущества трёхфазных систем	267
60. Трансформаторы	268
Введение	268
Принцип работы трансформатора.....	268
Векторная диаграмма ненагруженного трансформатора	270
Уравнение ЭДС трансформатора.....	271
Векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой.....	272
Конструкции трансформаторов	273
Эквивалентная схема трансформатора	274
Изменение выходного напряжения трансформатора.....	276
Потери и коэффициент полезного действия трансформаторов.....	277
Потери мощности в трансформаторах	277
Коэффициент полезного действия трансформатора	278
Максимальный коэффициент полезного действия	279
Согласование сопротивлений источника питания и нагрузки	279
Автотрансформаторы	280
Экономия меди при изготовлении автотрансформаторов.....	282
Преимущества автотрансформаторов	282

Недостатки автотрансформаторов.....	282
Применение автотрансформаторов.....	283
Изолирующие трансформаторы.....	283
Трёхфазные трансформаторы.....	283
Токовые трансформаторы.....	284
Трансформаторы напряжения.....	286
61. Машины постоянного тока.....	287
Введение.....	287
Механическое действие электрического тока.....	287
Устройство машины постоянного тока.....	289
Параллельные, последовательные и смешанные обмотки.....	290
ЭДС, генерируемая обмотками якоря.....	291
Генераторы постоянного тока.....	292
Типы генераторов постоянного тока и их характеристики.....	292
Генератор с независимым возбуждением.....	292
Генератор параллельного возбуждения.....	293
Генератор последовательного возбуждения.....	295
Генератор смешанного возбуждения.....	296
Потери мощности в машинах постоянного тока.....	298
Коэффициент полезного действия генератора постоянного тока.....	298
Электродвигатель постоянного тока.....	300
Противо-ЭДС и полная электрическая мощность.....	300
Вращающий момент электродвигателя.....	301
Типы электродвигателей и их характеристики.....	302
Электродвигатель параллельного возбуждения.....	302
Электродвигатель последовательного возбуждения.....	304
Электродвигатель смешанного возбуждения.....	306
Коэффициент полезного действия электродвигателей постоянного тока.....	308
Стартёр электродвигателя постоянного тока.....	309
Управление скоростью электродвигателя постоянного тока.....	310
Электродвигатель с параллельным возбуждением.....	310
Электродвигатель с последовательным возбуждением.....	311
Охлаждение электродвигателя.....	312
62. Электродвигатели переменного тока.....	313
Введение.....	313
Создание вращающегося магнитного поля.....	313
Скорость синхронизации.....	316
Устройство трёхфазного асинхронного двигателя.....	318
Принцип работы трёхфазного асимметричного двигателя.....	319

Скольжение	320
ЭДС и частота вращения ротора.....	321
ЭДС ротора	321
Частота ротора	321
Импеданс и ток ротора.....	322
Активное сопротивление ротора	322
Реактивное сопротивление ротора	322
Импеданс ротора	322
Ток ротора	323
Потери на медь	323
Потери асинхронного двигателя и коэффициент полезного действия	324
Уравнение вращающего момента для асинхронного двигателя.....	326
Характеристики «вращающий момент/скорость»	327
Методы запуска асинхронных двигателей	329
Короткозамкнутый ротор	329
Фазный ротор	331
Достоинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	331
Достоинства асинхронных двигателей с фазным ротором.....	332
Двухклеточный асинхронный двигатель	332
Применение трехфазных асинхронных двигателей.....	333
Однофазный асинхронный двигатель	333
Трёхфазный синхронный двигатель	333
Однофазные синхронные двигатели	334
63. Комплексные числа и операции над ними	335
Понятие комплексных чисел	335
Операции с использованием декартовых комплексных чисел	337
Сложение и вычитание	337
Умножение.....	337
Сопряжённые комплексные числа	338
Деление	338
Комплексные уравнения	339
Комплексное число в тригонометрической форме	339
Умножение и деление комплексных чисел в тригонометрической форме	341
Умножение.....	341
Деление	341
Возведение в степень комплексных чисел и извлечение корней из них (теорема Муавра).....	342

64. Анализ последовательных цепей переменного тока с применением комплексных чисел	344
Введение	344
Цепь переменного тока с чисто активным сопротивлением.....	344
Чисто индуктивная цепь переменного тока	345
Чисто ёмкостная цепь переменного тока	345
<i>R-L</i> последовательная цепь.....	346
<i>R-C</i> последовательная цепь.....	348
<i>R-L-C</i> последовательная цепь	350
65. Анализ параллельных цепей переменного тока с применением комплексных чисел	353
Введение	353
Проводимость активная, реактивная и полная.....	353
Параллельные цепи переменного тока.....	354
Распределение тока в цепях переменного тока	356
66. Мощность и коэффициент мощности в цепях переменного тока	360
Мощность в цепях переменного тока.....	360
Треугольник мощностей и коэффициент мощности	362
Определение мощности с применением комплексных чисел.....	364
Увеличение коэффициента мощности	365
67. Мосты переменного тока	369
Введение	369
Состояние равновесия в измерительных мостах переменного тока	369
Процедура определения уравнений равновесия для любого моста переменного тока	371
Типы индикаторов.....	371
Разновидности мостовых схем переменного тока	372
Простой мост Максвелла	372
Мост Хэя	374
Мост Оуэна	375
Мост Максвелла—Вина.....	375
Мост Саути.....	376
Мост Шеринга	376
Мост Вина.....	377
68. Последовательный резонанс и добротность	379
Введение	379
Последовательный резонанс.....	379
Добротность.....	382
Повышение напряжения.....	386
Добротность компонентов последовательной цепи и полная добротность	388

Ширина полосы частот	388
Избирательность	390
Небольшие отклонения от резонансной частоты	392
69. Параллельный резонанс и добротность	395
Общие понятия о параллельном резонансе	395
Параллельная $L-R-C$ цепь	397
Динамическое сопротивление	399
Добротность параллельной $R-L-C$ цепи	399
Частота свободных колебаний и резонансная частота вынужденных колебаний	401
Параллельная $LR-CR$ цепь	402
Добротность компонентов параллельной цепи и полная добротность	404
Небольшие отклонения от резонансной частоты	404
70. Анализ цепей с помощью определителей	406
Введение	406
Решение систем уравнений с помощью определителей	407
Система уравнений с двумя неизвестными	407
Система уравнений с тремя неизвестными	408
Применение законов Кирхгофа к теории цепей	410
71. Анализ цепей методами контурных токов и узловых потенциалов	415
Метод контурных токов	415
Метод узловых потенциалов	417
72. Принцип суперпозиции	422
Введение	422
Применение принципа суперпозиции для цепи постоянного тока	422
Применение принципа суперпозиции для цепи переменного тока	425
73. Теорема Тевенина и теорема Нортона	429
Введение	429
Теорема Тевенина	429
Теорема Нортона	434
Эквивалентность цепей Тевенина и Нортона	438
74. Преобразования «треугольник—звезда» и «звезда—треугольник»	442
Введение	442
Соединения «треугольник» и «звезда»	442
Преобразование «треугольник—звезда»	443
Преобразование «звезда—треугольник»	446
75. Теоремы о максимуме отдаваемой мощности и согласование импедансов	449
Теоремы о максимуме отдаваемой мощности	449

Согласование импедансов	452
76. Периодические сигналы сложной формы	456
Введение	456
Основное уравнение периодических сигналов сложной формы	457
Гармонический синтез.....	458
Действующее и среднее значения величин и коэффициент формы сложного сигнала	460
Действующее значение величин	460
Среднее значение	460
Коэффициент формы	461
Мощность периодического сложного сигнала	461
Коэффициент мощности	462
Гармоники в однофазной цепи	463
«Чистое» сопротивление	464
«Чистая» индуктивность.....	464
«Чистая» ёмкость	465
Селективный резонанс.....	468
Источники гармоник	470
77. Численные методы гармонического анализа	477
Введение	477
Гармонический анализ на основе данных, представленных в виде таблицы или графика	477
Оценка сложных сигналов	483
78. Диэлектрики и диэлектрические потери	484
Электрические поля, ёмкость и диэлектрическая проницаемость	484
Поляризация.....	485
Электрическая прочность диэлектрика.....	486
Тепловые эффекты	489
Механические свойства	489
Типы конденсаторов, применяемых на практике.....	489
Жидкие диэлектрики и газовая изоляция	490
Диэлектрические потери и угол потерь.....	490
Последовательное соединение.....	490
Параллельное соединение.....	492
Потери мощности.....	493
79. Эффекты электрического поля в электротехнических устройствах	495
Введение	495
Ёмкость между концентрическими цилиндрами.....	496
Напряжённость электрического поля в диэлектрике	498
Размеры самого экономичного кабеля	499

Ёмкость изолированной двухпроводной линии	500
Энергия, накопленная в электрическом поле.....	500
Скин-эффект.....	501
Индуктивность концентрического цилиндра (или коаксиального кабеля).....	502
Индуктивность изолированной двухпроводной линии	502
Энергия, накопленная в магнитном поле	503
80. Атенюаторы.....	504
Введение	504
Четырёхполюсники	504
Характеристический импеданс.....	505
Логарифм отношения двух мощностей.....	505
Симметричный T -образный аттенюатор	507
Расчёт симметричного T -образного аттенюатора.....	507
Симметричный π -образный аттенюатор.....	508
Расчёт симметричного π -образного аттенюатора	509
Вносимые потери	510
Асимметричные T - и π -образные аттенюаторы.....	512
G -образный аттенюатор.....	516
Каскадное соединение четырёхполюсников	516
81. Фильтры	519
Введение	519
Фильтры нижних частот.....	519
Фильтры верхних частот	521
Полосовые фильтры	523
Заграждающие фильтры.....	524
82. Модуляция.....	526
Введение	526
Амплитудная модуляция.....	526
Частотная модуляция	527
Девияция частоты, диапазон изменения частоты и модулирующий индекс	528
Фазовая модуляция	529
Импульсная модуляция	529
Импульсно-кодовая модуляция	530
83. Двухпроводные линии связи (длинные линии).....	532
Введение	532
Первичные параметры линий связи.....	532
Задержка по фазе, длина волны и скорость распространения	534
Задержка по фазе	535
Длина волны	535
Скорость распространения	536

Вторичные параметры линий связи	537
Связь характеристического импеданса и коэффициента распространения волны с первичными параметрами линии	538
Искажения в линиях связи	540
Отражение волны и коэффициент отражения	541
Энергия, связанная с распространяющейся волной.....	541
Коэффициент отражения.....	542
Стоячие волны и коэффициент стоячей волны	543
Коэффициент стоячей волны	548
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	550

Часть третья

От электрических
зарядов и магнитов
к электро-
генераторам,
транзисторам
и каналам связи

40. ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Символьные обозначения электрических компонентов

Разветвлённые электрические цепи часто называют *электрическими схемами*. Для их отображения на бумаге или на экране дисплея используют чертежи, на которых с помощью условных знаков (символов) и линий обозначены отдельные компоненты и проводники, соединяющие их.

На **Рис. 40.1** представлены наиболее распространённые символы компонентов, образующих электрические цепи.

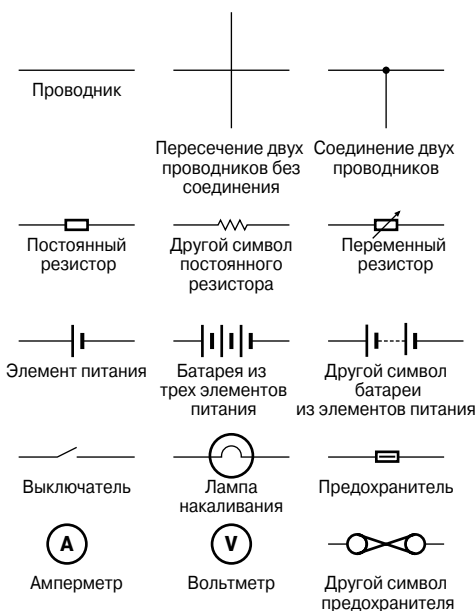


Рис. 40.1

О других компонентах электрических схем (конденсаторах, транзисторах и т.п.) и их назначении речь пойдёт в последующих главах.

Блок-схемы электрических/электронных систем

Электрическая/электронная блок-схема — это группа компонентов, соединение которых выполняет предписанную функцию. На **Рис. 40.2** показана простейшая система оповещения по трансляционной сети, где микрофон используется как прибор, принимающий акустическую энергию в форме волн звукового

давления и преобразующий её в электрическую энергию в форме небольших напряжений и токов, называемых *электрическими сигналами*.

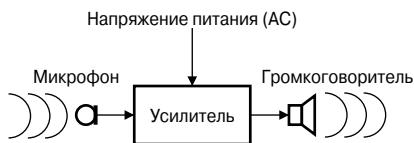


Рис. 40.2

Затем сигнал, поступивший от микрофона, усиливается с помощью электронного устройства, содержащего транзисторы и интегральные схемы, после чего поступает на громкоговоритель.

Подсистема — это часть системы, выполняющая определённую функцию в системе. Усилитель, показанный на Рис. 40.2, — пример такой подсистемы.

Компонент, или *элемент*, — это, как правило, наименьшая часть системы, у которой есть определённая и чётко обозначенная функция. На Рис. 40.2, например, таким элементом является микрофон.

В целом Рис. 40.1 отображает то, что называют *блок-схемой*.

Работу электрических/электронных систем, которые часто бывают очень сложными, легче понять, если их представить в виде такой блок-схемы. Для того чтобы понять, как работает вся система, совсем не обязательно досконально знать, что происходит в каждой подсистеме.

Другой пример технической системы представлен на Рис. 40.3, где показана система контроля температуры, включающая источник тепла (например, газовый нагреватель), блок управления подачей топлива (например, электромагнитный клапан), термореле и источник электроэнергии.

Эта система может быть представлена в виде блок-схемы (Рис. 40.4); термореле сравнивает температуру в помещении с заданной желаемой температурой и регулирует выключение/включение переключателя.

Существует много типов технических систем. *Система связи* — один из примеров, где локальная сеть могла бы включать в себя сервер, коаксиальный кабель, сеть адаптеров, несколько компьютеров и лазерный принтер. *Электромеханическая система* — ещё один пример, где электрическая система автомобиля могла бы содержать батарею, двигатель, стартер, катушку зажигания, прерыватель контакта и распределительный элемент. Все подобные системы могут быть представлены блок-схемами.

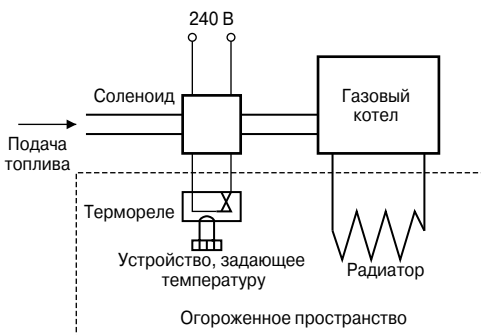


Рис. 40.3

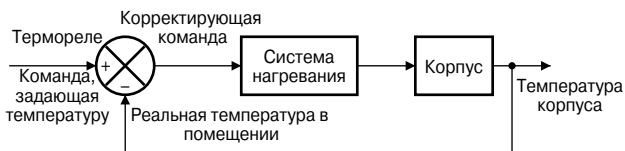


Рис. 40.4

Электрический ток и количество электричества

Все *атомы* состоят из *протонов*, *нейтронов* и *электронов*. Протоны, положительно заряженные частицы, и нейтроны, частицы, не имеющие заряда, входят в состав *атомного ядра*. Вне ядра находятся микроскопические отрицательно заряженные частицы, называемые *электронами*. Атомы различных материалов отличаются друг от друга тем, что обладают разным числом протонов, нейтронов и электронов. В атоме существует равное число протонов и электронов, и они, как говорится, находятся в электрическом равновесии, так как заряды положительных и отрицательных частиц уравнивают друг друга.

Если в атоме больше двух электронов, они образуют *электронные оболочки*, находящиеся на некоторых определённых расстояниях от атомных ядер.

Все атомы притягиваются друг к другу благодаря мощной силе притяжения, существующей между ядрами и электронами. Однако электроны на внешней оболочке атома притягиваются ядром меньше, чем электроны, находящиеся на более близких к нему оболочках.

Атом может потерять электрон, и тогда он превращается в положительно заряженный *ион*, который уже не находится в электрическом равновесии, а следовательно, может притягивать к себе электрон другого атома. Электроны, движущиеся от од-

ного атома к другому, называются *свободными электронами*. Такое хаотичное движение может существовать само по себе. Однако если к материалу приложить *электрическое напряжение*, то электроны, как правило, начинают двигаться в определённом направлении. Такое движение свободных электронов, называемое *дрейфом*, создаёт электрический поток, или ток. Следовательно, *ток — это разновидность движения заряженных частиц*.

Проводники — это твёрдые тела, содержащие электроны, слабо связанные с ядром, и поэтому имеющие возможность легко перемещаться по материалу от одного атома к другому. *Изоляторы* — это материалы, электроны которых имеют сильные связи со своими атомами.

Единицу *электрического заряда* Q называют *кулоном* [Кл] (1 кулон равен заряду 6.24×10^{18} электронов).

Если в проводнике дрейф электронов происходит со скоростью 1 кулон в секунду, то говорят, что протекающий в результате ток равен одному *амперу* [А].

Следовательно, 1 ампер = 1 кулон в секунду, или $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$.

Соответственно 1 кулон = 1 ампер-секунда, или $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А}\cdot\text{с}$.

Обобщая, можно сказать, что, если I — ток, измеряемый в амперах, а t — время в секундах, в течение которого течёт ток, то $I \times t$ характеризует количество электрического заряда в кулонах, то есть количество перемещённого электрического заряда

$$Q = I \times t$$

Например, если ток силой 10 ампер течёт в течение четырёх минут, количество перемещённого электричества

$$Q = It = 10 \times 240 = 2\,400 \text{ Кл.}$$

Электрический потенциал и ЭДС

Единица *электрического потенциала* — *вольт* [В]. Один вольт — это один джоуль на кулон [Дж/Кл]. Один вольт определяют как разность потенциалов между двумя точками проводника, который, при токе в один ампер, рассеивает мощность в один ватт, то есть

$$\begin{aligned} \text{вольт} &= \frac{\text{ватт}}{\text{ампер}} = \frac{\text{джоуль/секунда}}{\text{ампер}} = \\ &= \frac{\text{джоуль}}{\text{ампер}\cdot\text{секунда}} = \frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}. \end{aligned}$$

Изменение электрического потенциала между двумя точками электрической цепи называют *разностью потенциалов*.

Электродвижущая сила (ЭДС), обеспечиваемая источником энергии, например батареей или генератором, также измеряется в вольтах.

Для того чтобы между двумя точками цепи протекал постоянный ток, необходимо, чтобы между ними существовала разность потенциалов, или *электрическое напряжение* V . Если требуется, чтобы в цепи протекал ток, цепь, включающая источник электроэнергии, должна быть замкнута.

На **Рис. 40.5** показан элемент питания, подсоединённый к лампе накаливания. Принято считать, что ток течёт от положительного электрода элемента по цепи к отрицательному электроду.

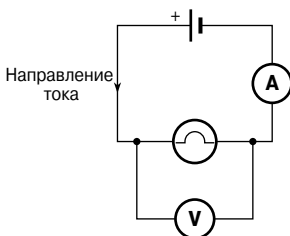


Рис. 40.5

Сопротивление и проводимость

Электрический ток подвержен трению. Это трение, или противодействие, называется электрическим *сопротивлением* R и является свойством проводника, которое ограничивает ток. Единица электрического сопротивления — *ом* [Ом]. Один ом определяют как сопротивление току силой один ампер, протекающему через это сопротивление, когда к нему подсоединено напряжение в один вольт.

$$\text{Сопротивление} = \frac{\text{разность потенциалов}}{\text{сила тока}},$$

то есть

$$R = \frac{V}{I}$$

где V — разность потенциалов в вольтах между двумя точками, I — ток, текущий между этими точками, в амперах.

Компоненты электрических цепей, обладающие сопротивлением электрическому току, называют *резисторами*. С их помощью создаётся требуемая разность потенциалов, ограничивается ток и т.д. Резисторы могут быть постоянными (их сопротивление не может быть изменено) и переменными, имеющими регулятор подстройки сопротивления.

Величину, обратную сопротивлению, называют *проводимостью*. Следовательно, проводимость

$$G = \frac{1}{R}$$

Единица проводимости — *сименс* [См].

Основные электроизмерительные приборы

Амперметр — это прибор для измерения силы тока; в цепь он включается последовательно с элементами, через которые протекает ток. На **Рис. 40.5** показан соединённый последовательно с лампой амперметр, который измеряет ток, протекающий через эту лампу. Чтобы влияние самого амперметра на величину тока, протекающего в цепи, было минимальным, он должен обладать очень низким сопротивлением.

Вольтметр — это прибор для измерения разности потенциалов. Его следует подсоединять параллельно к той части цепи, разность потенциалов которой необходимо измерить. Чтобы через вольтметр не протекал слишком большой ток, он должен иметь очень высокое сопротивление.

Омметр — это прибор для измерения сопротивлений.

Мультиметр, или универсальный измерительный прибор, можно использовать для измерения и напряжения, и силы тока, и сопротивления. Типичный пример такого прибора — *ампер-вольтметр*.

Электронный осциллограф можно использовать как для наблюдения за формой сигнала, так и для измерения напряжения и силы тока. На экране прибора виднодвигающееся пятно света. То, насколько пятно отклонилось от своего первоначального положения, зависит от разности потенциалов, приложенной к выводам осциллографа, и от выбранного диапазона напряжений. Это смещение откалибровано в «вольтах на сантиметр». Например, если пятно сместилось на 3 см и масштаб составляет 10 В/см, то величина ЭДС равна 3 см × 10 В/см, то есть 30 В.

(Более подробно описание приборов для измерения электрических величин см. в гл. 50.)

Линейные и нелинейные компоненты электрических схем

На **Рис. 40.6** показана электрическая цепь, где ток I может быть изменён с помощью резистора переменного сопротивления R_2 .

При различных значениях R_2 с помощью амперметра измеряют ток, протекающий в резисторе R_1 , и разность потенциалов на концах R_1 , показанную вольтметром. По результатам замеров строят показанную на **Рис. 40.7а** зависимость разности потенциалов от тока.

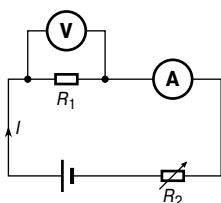


Рис. 40.6

График зависимости в виде прямой, проходящей через начало координат, показывает, что ток прямо пропорционален разности потенциалов.



Рис. 40.7

Так как градиент, то есть $\frac{\text{разность потенциалов}}{\text{сила тока}}$, — это величина постоянная, то и сопротивление R_1 постоянно. Следовательно, резистор — это пример *линейного компонента*.

Если резистор R_1 на Рис. 40.6 заменить таким компонентом, как лампа, и снимать показания вольтметра для разных токов, то получится кривая, показанная на Рис. 40.7б. Так как градиент в данном случае изменяется, лампа — это пример *нелинейного компонента*.

Закон Ома

Закон Ома гласит, что ток I , протекающий по цепи, прямо пропорционален приложенному напряжению V и обратно пропорционален сопротивлению R при постоянной температуре. Следовательно,

$$\boxed{I = \frac{V}{R}} \quad \text{или} \quad \boxed{V = IR} \quad \text{или} \quad \boxed{R = \frac{V}{I}}$$

Например, ток, протекающий через резистор, равен 0.8 А. Если разность потенциалов составляет 20 В, то по закону Ома

$$R = \frac{V}{I} = \frac{20}{0.8} = \frac{200}{8} = 25 \text{ Ом.}$$

Множители и делители

Ток, напряжение и сопротивление зачастую бывают очень большими или очень маленькими. Поэтому часто для сокращения записи применяют множители или делители единиц, о чём рассказывалось в гл. 1 кн 1. Наиболее распространённые из них представлены в **Табл. 40.1**.

Таблица 40.1

Приставка	Наименование	Значение действия	Пример
М	мега	умножить на 1 000 000 (то есть $\times 10^6$)	2 МОм = = $2 \times 1\,000\,000$ Ом = = 2 000 000 Ом
к	кило	умножить на 1 000 (то есть $\times 10^3$)	10 кВ = $10 \times 1\,000$ В = 10 000 вольт
м	мили	разделить на 1 000 (то есть $\times 10^{-3}$)	25 мА = $\frac{25}{1\,000}$ А = = 0.025 ампер
мк	микро	разделить на 1 000 000 (то есть $\times 10^{-6}$)	50 мкВ = $\frac{50}{1\,000\,000}$ В = = 0.000005 вольт

Например, батарея 100 В подсоединена к резистору и создаёт ток силой 5 мА. Сопротивление резистора в этом случае равно

$$R = \frac{V}{I} = \frac{100}{5 \times 10^{-3}} = \frac{100 \times 10^3}{5} = 20 \times 10^3 = \mathbf{20 \text{ кОм.}}$$

Если напряжение уменьшить, к примеру, до 25 В, то потечёт ток, равный

$$I = \frac{V}{R} = \frac{25}{20 \times 10^3} = \frac{25}{20} \times 10^{-3} = \mathbf{1.25 \text{ мА.}}$$

Проводники и изоляторы

Проводник — это материал, обладающий низким сопротивлением, что позволяет току течь через него без больших потерь. Все металлы являются проводниками, в их числе медь, алюминий, бронза, платина, серебро, золото. Графит также является проводником.

Изолятор — это материал, обладающий высоким сопротивлением, которое не даёт току возможность течь через него. К изоляторам относятся пластмасса, резина, стекло, фарфор, воздух, бумага, пробка, слюда, керамика и некоторые масла.

Электрическая мощность

Произведение разности потенциалов V и силы тока I определяет *мощность* P , рассеиваемую электрической цепью. Единица мощности — *ватт* [Вт].

Следовательно,

$$P = V \times I$$

Применяя закон Ома, можно показать, что мощность можно также выразить как произведение сопротивления квадрата тока, протекающего через это сопротивление, то есть

$$P = I^2 R$$

или

отношение квадрата разности потенциалов на сопротивлении к этому сопротивлению, то есть

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Таким образом, существуют три формулы, по которым можно подсчитать мощность.

Например, если через резистор с сопротивлением 5 кОм течёт ток силой 4 мА, то рассеиваемая на резисторе мощность равна

$$\begin{aligned} P &= I^2 R = (4 \times 10^{-3})^2 (5 \times 10^3) = 16 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^3 = \\ &= 80 \times 10^{-3} = \mathbf{0.08 \text{ Вт}}, \text{ или } \mathbf{80 \text{ мВт}}. \end{aligned}$$

С другой стороны,

так как $I = 4 \times 10^{-3}$ и $R = 5 \times 10^3$, то по закону Ома напряжение

$$V = IR = 4 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^3 = \mathbf{20 \text{ В}}.$$

Следовательно, мощность

$$P = V \times I = 20 \times 4 \times 10^{-3} = \mathbf{80 \text{ мВт}}.$$

Электроэнергия

$$\text{Электрическая энергия} = \text{мощность} \times \text{время}$$

Если мощность измерять в ваттах, а время — в секундах, то тогда единица *электрической энергии* — ватт-секунда, или *джоуль* [Дж].

Если мощность измерять в киловаттах, а время в часах, то единица энергии — *киловатт-час* [кВт·час], который в быту зачастую называют «единицей электричества». «Счётчик электроэнергии», который устанавливают в домах, регистрирует количество использованных киловатт-часов, а следовательно, является счётчиком энергии.

$$\begin{aligned} 1 \text{ киловатт-час} &= 1\,000 \text{ ватт-час} = 1\,000 \times 60 \times 60 = \\ &= 3\,600\,000 \text{ ватт-секунд, или джоулей.} \end{aligned}$$

Например, электрическое оборудование в офисе потребляет ток 13 А от источника питания 240 В. Оборудование работает в течение 30 часов каждую неделю, а 1 кВт энергии стоит 7 пенсов. Определим еженедельные затраты на электроэнергию.

$$\text{Мощность} = VI \text{ ватт} = 240 \times 13 = 3\,120 \text{ Вт} = \mathbf{3.12 \text{ кВт.}}$$

$$\begin{aligned} \text{Затраченная энергия} &= \text{мощность} \times \text{время} = (3.12 \text{ кВт}) \times (30 \text{ ч.}) = \\ &= \mathbf{93.6 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}} \end{aligned}$$

При стоимости 7 пенсов за 1 киловатт-час вся затраченная электроэнергия стоит

$$93.6 \times 7 = 655.2 \text{ пенса.}$$

Итого, еженедельная стоимость электричества = £ 6.55.

Основные эффекты электрического тока

К трём основным последствиям работы электрической цепи при протекании в ней тока относят: эффект магнитного поля, химический и тепловой эффекты.

Эффекты электрического тока находят применение во многих приборах и технологических процессах.

Магнитный эффект: звонки, реле, моторы, генераторы, трансформаторы, телефоны, зажигание в автомобиле, подъёмные магниты и др. (см. гл. 47).

Химический эффект: первичные и вторичные элементы питания и гальваническое покрытие (см. гл. 42).

Тепловой эффект: электроплиты, водные нагреватели, электрические камины, утюги, топки, чайники, паяльники и т. п.

Предохранители

Предохранитель применяют для того, чтобы предотвратить перегрузку электрической цепи. Предохранитель на основе проволоки из материала с низкой температурой плавления использует тепловой эффект электрического тока. Предохранитель вставляют в электрическую цепь, и если ток становится слишком большим, то проволока предохранителя плавится, и цепь

размыкается. На электрических схемах предохранитель обозначают символом, показанным на **Рис. 40.1**.

Например, мощность электрического тостера, подсоединённого к источнику питания 240 В, равна 1 кВт.

Рассеиваемая мощность равна $P = VI$, откуда сила тока

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1\,000}{240} = \frac{100}{24} = 4.17 \text{ А.}$$

Следовательно, для тостера следует ставить **предохранитель на 5 А**.