

УДК 621.3
ББК 32.85
М77

Монк, Саймон

М77 Электроника. Теория и практика — 4-е изд.: Пер. с англ. / Саймон Монк, Пауль Шерц. — СПб.: БХВ-Петербург, 2018. — 1168 с.: ил. — (Электроника)
ISBN 978-5-9775-3847-3

В практическом руководстве излагаются основы электричества и разработки электронных устройств. Рассмотрено применение базовых компонентов, полупроводников, оптоэлектронных элементов и датчиков. Описана разработка и практическое применение операционных усилителей, фильтров, генераторов колебаний, таймеров, стабилизаторов и источников питания. Показано использование логических микросхем, жидкокристаллических и светодиодных дисплеев. Рассмотрены микроконтроллеры и платформы для разработки прототипов устройств, включая плату Arduino. Описано подключение электродвигателей постоянного тока, сервоприводов и шаговых двигателей, а также микрофонов, аудиоусилителей и громкоговорителей. Материал сопровождается подробными и доходчивыми инструкциями, принципиальными схемами и иллюстрациями. В четвертом издании книги добавлены полностью новые главы по датчикам, микроконтроллерам, модульной электронике и самым последним версиям программных инструментов.

Для радиолюбителей

УДК 621.3
ББК 32.85

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Шишигин</i>
Зав. редакцией	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Перевод с английского	<i>Сергея Таранушенко</i>
Редактор	<i>Анна Кузьмина</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Оформление обложки	<i>Марины Дамбиевой</i>

"БХВ-Петербург", 191036, Санкт-Петербург, Гончарная ул., 20.

ISBN 978-1-25-958754-2 (англ.)
ISBN 978-5-9775-3847-3 (рус.)

© 2016, 2013, 2007, 2000 by McGraw-Hill Education. All rights reserved
© Перевод на русский язык, оформление. ООО "БХВ-Петербург", 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Об авторах	16
О технических редакторах	16
Благодарности	17
Введение.....	18
Глава 1. Введение в электронику.....	19
Глава 2. Теория.....	23
2.1. Теоретические основы электроники	23
2.2. Электрический ток.....	24
2.2.1. Токи с разных точек зрения	27
2.3. Напряжение	28
2.3.1. Как возникает напряжение.....	29
2.3.2. Определение вольта и обобщенный закон мощности	32
2.3.3. Соединение нескольких батареек.....	34
2.3.4. Другие источники напряжения.....	35
2.3.5. Напряжение как вода.....	35
2.4. Проводимость на микроскопическом уровне (для тех, кого это интересует).....	37
2.4.1. Приложение напряжения	39
2.5. Сопротивление, удельное сопротивление и проводимость	41
2.5.1. Зависимость сопротивления от формы проводника	43
2.5.2. Удельное сопротивление и проводимость	44
2.6. Изоляторы, проводники и полупроводники	48
2.7. Тепло и мощность.....	51
2.8. Теплопроводность и тепловое сопротивление.....	54
2.8.1. Важность явления образования тепла.....	57
2.9. Калибры проводов	58
2.10. Заземления.....	61
2.10.1. Физическое заземление	62
2.10.2. Разные типы символов для разной "земли"	66
2.10.3. Дополнительные аспекты заземления.....	67
2.11. Электрические схемы	70
2.12. Закон Ома и резисторы.....	71
2.12.1. Номинальная мощность резистора.....	72
2.12.2. Параллельное соединение резисторов	74
2.12.3. Последовательное соединение резисторов.....	77
2.12.4. Упрощение сложной резисторной схемы.....	81
2.12.5. Делители напряжения на несколько нагрузок	83
2.13. Источники напряжения и тока.....	86
2.14. Измерение напряжения, тока и сопротивления	89
2.15. Соединение нескольких батареек.....	91

2.16. Разомкнутые и закороченные цепи	92
2.17. Правила Кирхгофа	94
2.18. Метод наложения	99
2.19. Теоремы Тевенина и Нортона	100
2.19.1. Теорема Тевенина	100
2.19.2. Теорема Нортона	102
2.20. Цепи переменного тока	105
2.20.1. Получение переменного тока	106
2.20.2. Аналогия переменного тока с водой	107
2.20.3. Пульсирующий постоянный ток	108
2.20.4. Объединение синусоидальных источников	108
2.20.5. Сигналы переменного тока	109
2.20.6. Описание сигнала переменного тока	110
2.21. Переменный ток и сопротивление, среднеквадратические напряжение и ток	113
2.22. Питание от электросети	118
2.23. Конденсаторы	121
2.23.1. Определение емкости	124
2.23.2. Промышленные конденсаторы	126
2.23.3. Номинальное напряжение и пробой диэлектрика	127
2.23.4. Ток смещения Максвелла	127
2.23.5. Зарядная модель протекания тока через конденсатор	129
2.23.6. Водяная аналогия конденсатора	131
2.23.7. Энергия в конденсаторе	133
2.23.8. Постоянная времени RC -цепи	133
2.23.9. Паразитная емкость	136
2.23.10. Параллельное соединение конденсаторов	137
2.23.11. Последовательное соединение конденсаторов	138
2.23.12. Конденсатор в цепях переменного тока	139
2.23.13. Емкостное сопротивление	140
2.23.14. Емкостный делитель	142
2.23.15. Добротность	142
2.24. Индукторы	143
2.24.1. Электромагнетизм	143
2.24.2. Магнитное поле и его воздействие	146
2.24.3. Самоиндукция	150
2.24.4. Индукторы	151
2.24.5. Водяная аналогия индуктора	156
2.24.6. Уравнения индуктивности	158
2.24.7. Энергия в индукторе	162
2.24.8. Сердечники индукторов	163
2.24.9. Уравнения индукторов	168
2.24.10. Подача питания на RL -цепь	171
2.24.11. Снятие питания с RL -цепи	174
2.24.12. Всплески напряжения, вызываемые переключением индуктивной нагрузки	178
2.24.13. Индуктивность прямого провода	178
2.24.14. Взаимная индуктивность и магнитная связь	180
2.24.15. Паразитные связи: всплески напряжения, разряды молнии и прочие пульсации	180
2.24.16. Последовательное и параллельное соединение индукторов	181
2.24.17. Индукторы в цепях переменного тока	182
2.24.18. Индуктивное сопротивление	183
2.24.19. Модель неидеального индуктора	185
2.24.20. Добротность	186
2.24.21. Применение индукторов	187
2.25. Моделирование сложных схем	187
2.26. Комплексные числа	191
2.27. Схемы с синусоидальными источниками	195
2.27.1. Анализ схем с синусоидальным сигналом с помощью комплексных импедансов	196
2.27.2. Источник синусоидального напряжения в комплексной нотации	199
2.27.3. Странные эффекты в реактивных цепях	206

2.28. Мощность в цепях переменного тока: кажущаяся мощность, активная мощность, реактивная мощность	207
2.28.1. Коэффициент мощности	209
2.29. Теорема Тевенина для переменных токов	217
2.30. Резонансные контуры	219
2.30.1. Резонанс в RLC -схемах	224
2.30.2. Падение напряжения на компонентах резонансного RLC -контура	227
2.30.3. Активные потери конденсатора	228
2.30.4. Параллельные резонансные контуры	229
2.30.5. Добротность нагруженных контуров	236
2.31. О децибелах	237
2.31.1. Альтернативные представления в децибелах	240
2.32. Входной и выходной импеданс	241
2.32.1. Входной импеданс	241
2.32.2. Выходной импеданс	242
2.33. Четырехполюсники и фильтры	243
2.33.1. Фильтры	243
2.33.2. Атенюаторы	256
2.34. Цепи с переходными процессами	258
2.34.1. Последовательная RLC -схема	267
2.35. Цепи с периодическим несинусоидальным сигналом	271
2.35.1. Ряд Фурье	272
2.36. Непериодические сигналы	278
2.37. Эмулятор SPICE	280
2.37.1. Принцип работы программы SPICE	283
2.37.2. Ограничения программы SPICE и других эмуляторов	285
2.37.3. Пример простой эмуляции	285

Глава 3. Основные компоненты электронных схем 289

3.1. Провода, кабели и разъемы	289
3.1.1. Провода	289
3.1.2. Кабели	291
3.1.3. Разъемы	294
3.1.4. Обозначения проводов и разъемов	297
3.1.5. Высокочастотные эффекты в проводах и кабелях	298
3.2. Батареи	308
3.2.1. Принцип работы элемента батареи	309
3.2.2. Первичные батареи	310
3.2.3. Сравнение первичных батарей	311
3.2.4. Вторичные элементы	316
3.2.5. Сравнение вторичных (перезаряжаемых) элементов	316
3.2.6. Емкость батареи	325
3.2.7. Внутреннее падение напряжения элемента	327
3.3. Переключатели	329
3.3.1. Принцип работы переключателя	329
3.3.2. Описание переключателя	329
3.3.3. Типы переключателей	331
3.3.4. Простое применение переключателей	332
3.4. Реле	334
3.4.1. Типы реле	335
3.4.2. Несколько замечаний о реле	337
3.4.3. Простые схемы с применением реле	338
3.5. Резисторы	339
3.5.1. Сопротивление и закон Ома	341
3.5.2. Последовательное и параллельное соединения резисторов	342
3.5.3. Маркировка резисторов	345
3.5.4. Характеристики реальных резисторов	347
3.5.5. Типы резисторов	356
3.5.6. Переменные резисторы (реостаты, потенциометры, подстроечники)	362
3.5.7. Характеристики потенциометров	365

3.6. Конденсаторы.....	368
3.6.1. Емкость.....	369
3.6.2. Параллельное соединение конденсаторов.....	370
3.6.3. Последовательное соединение конденсаторов	370
3.6.4. Постоянная времени RC -цепи	371
3.6.5. Емкостное сопротивление.....	372
3.6.6. Настоящий конденсатор.....	373
3.6.7. Характеристики конденсаторов.....	374
3.6.8. Типы конденсаторов.....	378
3.6.9. Применение конденсаторов.....	389
3.6.10. Схемы тактирования и выборки и хранения	395
3.6.11. Сглаживающий RC -фильтр.....	396
3.6.12. Дугогашение.....	400
3.6.13. Применение суперконденсаторов	401
3.6.14. Задачи	403
3.7. Индукторы.....	404
3.7.1. Индуктивность.....	406
3.7.2. Изготовление индукторов.....	407
3.7.3. Последовательное и параллельное соединение индукторов.....	407
3.7.4. Постоянная времени RL -цепи.....	407
3.7.5. Индуктивное сопротивление	410
3.7.6. Реальный индуктор.....	410
3.7.7. Характеристики индукторов.....	411
3.7.8. Типы индукторов	412
3.7.9. Маркировка индукторов	417
3.7.10. Применение индукторов	419
3.7.11. Советы по минимизированию электромагнитных помех и паразитных связей при разработке печатных плат.....	423
3.8. Трансформаторы.....	425
3.8.1. Основные понятия	425
3.8.2. Конструкция сердечников трансформаторов.....	436
3.8.3. Автотрансформаторы и регулируемые трансформаторы	438
3.8.4. Гальваническая развязка и развязывающий трансформатор.....	440
3.8.5. Стандартные и специализированные трансформаторы	441
3.8.6. Применение трансформаторов	443
3.9. Предохранители и автоматические выключатели	449
3.9.1. Типы предохранителей и автоматических выключателей.....	450
Глава 4. Полупроводники	453
4.1. Полупроводниковая технология.....	453
4.1.1. Что собой представляют полупроводники.....	453
4.1.2. Применение кремния.....	458
4.2. Диоды.....	459
4.2.1. Принцип работы диодов с p - n -переходом	459
4.2.2. Водяная аналогия диода.....	461
4.2.3. Типы диодов.....	462
4.2.4. Практические рекомендации	463
4.2.5. Применение выпрямительных диодов.....	464
4.2.6. Стабилитроны	476
4.2.7. Применение стабилитронов.....	480
4.2.8. Варакторы (параметрические диоды)	483
4.2.9. PIN-диоды.....	485
4.2.10. Микроволновые диоды (ЛПД, Ганна, туннельные и другие).....	486
4.2.11. Примеры	486
4.3. Транзисторы	489
4.3.1. Введение в транзисторы.....	489
4.3.2. Биполярные транзисторы.....	491
4.3.3. Полевые транзисторы с управляющим переходом.....	517
4.3.4. Полевые МОП-транзисторы	530
4.3.5. Биполярные транзисторы с изолированным затвором.....	542
4.3.6. Однопереходные транзисторы.....	542

4.4. Тиристоры	547
4.4.1. Введение	547
4.4.2. Кремниевые управляемые выпрямители	548
4.4.3. Тетроидный тиристор	552
4.4.4. Симисторы	554
4.4.5. Диодные тиристоры и симметричные динисторы	557
4.5. Подавители помех	559
4.5.1. Помехи	559
4.5.2. Устройства для подавления помех	560
4.6. Интегральные схемы	570
4.6.1. Типы корпусов интегральных схем	571

Глава 5. Оптоэлектроника 573

5.1. Короткая лекция по фотонам	573
5.2. Лампы накаливания	575
5.2.1. Типы ламп	576
5.2.2. Техническая информация о лампах освещения	577
5.3. Светодиоды	578
5.3.1. Принцип работы светодиодов	578
5.3.2. Типы светодиодов	579
5.3.3. Дополнительные сведения о светодиодах	581
5.3.4. Применение светодиодов	584
5.3.5. Лазерные диоды	586
5.4. Фоторезисторы	593
5.4.1. Принцип работы фоторезисторов	594
5.4.2. Технические заметки	594
5.4.3. Применения фоторезисторов	594
5.5. Фотодиоды	596
5.5.1. Принцип работы фотодиодов	596
5.5.2. Базовые функции фотодиодов	597
5.5.3. Типы фотодиодов	598
5.6. Фотогальванические элементы	598
5.6.1. Базовые функции фотогальванических элементов	599
5.7. Фототранзисторы	600
5.7.1. Принцип работы биполярных фототранзисторов	600
5.7.2. Основные конфигурации схем с фототранзисторами	601
5.7.3. Типы фототранзисторов	601
5.7.4. Технические заметки	602
5.7.5. Применения фототранзисторов	602
5.8. Фототиристоры	604
5.8.1. Принцип работы активируемых светом кремниевых управляемых выпрямителей	604
5.8.2. Базовая операция, выполняемая АСКУВ	605
5.9. Оптоизоляторы	605
5.9.1. Интегрированные оптопары	606
5.9.2. Применения оптронов	606
5.10. Оптические волокна	607

Глава 6. Датчики..... 609

6.1. Общие принципы датчиков	611
6.1.1. Точность, правильность и разрешение	611
6.1.2. Эффект наблюдателя	612
6.1.3. Калибровка	612
6.2. Датчики температуры	613
6.2.1. Термисторы	613
6.2.2. Термопары	616
6.2.3. Резистивные датчики температуры	616
6.2.4. Температурные датчики на микросхемах с аналоговым выходом	617
6.2.5. Температурные датчики на микросхемах с цифровым выходом	617
6.2.6. Инфракрасные термометры и пирометры	618
6.2.7. Резюме	619

6.3. Датчики присутствия и касания	619
6.3.1. Сенсорные экраны	620
6.3.2. Ультразвуковые дальномеры	621
6.3.3. Оптические дальномеры	622
6.3.4. Емкостные датчики	623
6.3.5. Резюме	623
6.4. Датчики движения, усилия и давления	624
6.4.1. Пассивные инфракрасные датчики	625
6.4.2. Акселерометры	625
6.4.3. Датчики вращения	626
6.4.4. Поточковые датчики	627
6.4.5. Датчики усилия	628
6.4.6. Датчики наклона	629
6.4.7. Вибродатчики и датчики ударов	629
6.4.8. Датчики давления	629
6.5. Датчики химических веществ	630
6.5.1. Датчики дыма	630
6.5.2. Датчики газа	630
6.5.3. Датчики влажности воздуха	631
6.6. Датчики света, излучения, магнетизма и звука	631
6.6.1. Датчики света	631
6.6.2. Датчики ионизирующего излучения	631
6.6.3. Датчики магнитного поля	632
6.6.4. Датчики звука	632
6.7. Система глобального позиционирования	633

Глава 7. Практическая электроника 635

7.1. Техника безопасности	635
7.1.1. Что опасно для жизни и здоровья при работе с электроприборами?	635
7.1.2. Воздействие электростатического разряда на электронные устройства	639
7.1.3. Меры по защите компонентов от электростатического разряда	639
7.2. Конструирование схем	640
7.2.1. Создание принципиальной схемы устройства	640
7.2.2. Замечание по программным эмуляторам схем	642
7.2.3. Создание прототипа схемы	643
7.2.4. Конечная схема	643
7.2.5. Создание печатных плат	646
7.2.6. Специальные компоненты, применяемые в построении схем	652
7.2.7. Пайка	653
7.2.8. Демонтаж паяных соединений	653
7.2.9. Корпус для схемы	654
7.2.10. Вещи, которые полезно иметь под рукой	654
7.2.11. Поиск и устранение неполадок в разрабатываемых схемах	655
7.3. Мультиметры	656
7.3.1. Базовые операции	656
7.3.2. Принцип работы аналогового мультиметра	657
7.3.3. Принцип работы цифрового мультиметра	659
7.3.4. Замечание о погрешностях измерений	660
7.4. Осциллографы	661
7.4.1. Принцип работы осциллографа	662
7.4.2. Внутренняя электроника осциллографа	664
7.4.3. Фокусирование луча	665
7.4.4. Использование осциллографа	666
7.4.5. Назначение элементов управления осциллографа	667
7.4.6. Выполнение измерений посредством осциллографа	672
7.4.7. Другие применения осциллографа	677
7.4.8. Измерение импедансов с помощью осциллографа	678
7.5. Электронная лаборатория	680
7.5.1. Рабочее место	681
7.5.2. Контрольно-измерительная аппаратура	682

7.5.3. Мультиметры	683
7.5.4. Источники питания постоянного тока	684
7.5.5. Осциллограф	685
7.5.6. Щупы осциллографа	688
7.5.7. Генератор сигналов общего назначения	695
7.5.8. Частотомер	696
7.5.9. Компьютер	697
7.5.10. Прочая контрольно-измерительная аппаратура	697
7.5.11. Многофункциональные инструменты на основе ПК	698
7.5.12. Развязывающие трансформаторы	700
7.5.13. Регулируемые трансформаторы	702
7.5.14. Подстановочные магазины	704
7.5.15. Кабели, разъемы и адаптеры для тестового оборудования	706
7.5.16. Оборудование для пайки	707
7.5.17. Макетные платы	711
7.5.18. Ручные инструменты	713
7.5.19. Провода, кабели, крепеж и химикаты	714
7.5.20. Каталоги электронных деталей	717
7.5.21. Рекомендуемые электронные детали	719
7.5.22. САПР для электроники	722
7.5.23. Как самому сделать рабочий стол	724
Глава 8. Операционные усилители	729
8.1. Водяная аналогия операционного усилителя	731
8.2. Принцип работы операционного усилителя	732
8.3. Теория в основе работы операционных усилителей	732
8.4. Отрицательная обратная связь	735
8.5. Положительная обратная связь	741
8.6. Реальные операционные усилители	743
8.7. Характеристики операционных усилителей	747
8.8. Питание операционных усилителей	749
8.9. Практические замечания	750
8.10. Корректировка смещения напряжения и тока	751
8.11. Частотная коррекция	752
8.12. Компараторы	753
8.13. Компараторы с гистерезисом	754
8.13.1. Инвертирующий компаратор с гистерезисом	755
8.13.2. Неинвертирующий компаратор с гистерезисом	756
8.14. Использование компараторов с однополярным питанием	758
8.15. Двухпороговый компаратор	759
8.16. Индикатор уровня напряжения	759
8.17. Измерительные усилители	760
8.18. Другие применения компараторов	761
Глава 9. Фильтры	769
9.1. Что нужно знать, прежде чем приступить к разработке фильтров?	770
9.2. Основные типы фильтров	772
9.3. Разработка пассивных низкочастотных фильтров	773
9.4. Замечание по типам фильтров	777
9.5. Разработка пассивных высокочастотных фильтров	778
9.6. Разработка пассивных полосовых фильтров	780
9.6.1. Широкополосные полосовые фильтры	780
9.6.2. Узкополосные полосовые фильтры	781
9.7. Разработка пассивного режекторного фильтра	784
9.8. Разработка активных фильтров	786
9.8.1. Активный низкочастотный фильтр	787
9.8.2. Активный высокочастотный фильтр	789
9.8.3. Активные полосовые фильтры	790
9.8.4. Активные режекторные фильтры	793
9.9. Микросхемы фильтров	795

Глава 10. Генераторы колебаний и таймеры	797
10.1. Релаксационные <i>RC</i> -генераторы	798
10.2. Таймерная микросхема 555.....	802
10.2.1. Принцип работы микросхемы 555 (автоколебательный режим).....	802
10.2.2. Базовый автоколебательный режим.....	804
10.2.3. Работа микросхемы 555 в моностабильном режиме	806
10.2.4. Базовый моностабильный режим	807
10.2.5. Несколько важных замечаний о таймере 555.....	807
10.2.6. Простые приложения с таймером 555.....	809
10.3. Управляемые напряжением генераторы колебаний	810
10.4. Генератор с мостом Вина и генератор с двойным <i>T</i> -образным мостом	811
10.5. Синусоидальные <i>LC</i> -генераторы.....	812
10.6. Кварцевые генераторы	816
10.7. Генераторы на микроконтроллере	819
Глава 11. Стабилизаторы напряжения и источники питания.....	821
11.1. Микросхемы стабилизаторов напряжения	823
11.1.2. Микросхемы регулируемых стабилизаторов напряжения.....	824
11.1.3. Характеристики стабилизаторов напряжения.....	825
11.2. Краткий обзор применения стабилизаторов напряжения	826
11.3. Трансформатор.....	827
11.4. Типы выпрямителей	827
11.5. Несколько простых источников питания	828
11.6. Подавление пульсаций	832
11.7. Прочие аспекты источников питания	834
11.8. Импульсные стабилизаторы источников питания.....	836
11.9. Импульсные источники питания.....	840
11.10. Типы коммерческих источников питания	841
11.11. Конструкция источника питания.....	842
Глава 12. Цифровая электроника.....	845
12.1. Основы цифровой электроники.....	845
12.1.1. Цифровые логические состояния	846
12.1.2. Системы счисления, используемые в цифровой электронике.....	846
12.1.3. Тактирование, параллельная и последовательная передачи данных	854
12.2. Логические элементы	855
12.2.1. Логические элементы с несколькими входами	857
12.2.2. Микросхемы цифровых логических элементов	858
12.2.3. Приложения для одного логического элемента	859
12.2.4. Комбинационная логика	861
12.2.5. Упрощение логических схем (карты Карно).....	868
12.3. Комбинационные устройства	871
12.3.1. Мультиплексоры (селекторы данных) и двунаправленные переключатели	872
12.3.2. Демультиплексоры (распределители данных) и дешифраторы	874
12.3.3. Шифраторы и кодопреобразователи.....	877
12.3.4. Двоичные сумматоры	881
12.3.5. Двоичный сумматор-вычитатель.....	882
12.3.6. Компараторы и микросхемы компараторов величин	883
12.3.7. О прекращении использования специализированных микросхем и тенденции к использованию микроконтроллеров	884
12.4. Семейства логических микросхем	885
12.4.1. Микросхемы семейства КМОП.....	886
12.4.2. Входные-выходные напряжения и запас помехоустойчивости.....	887
12.4.3. Рабочий ток, нагрузочная способность по выходу и задержка распространения.....	888
12.5. Питание и тестирование логических микросхем	888
12.5.1. Развязка источника питания	889
12.5.2. Неиспользуемые выводы микросхем.....	889
12.5.3. Логические пробники и генераторы импульсов	890
12.6. Последовательностная логика	891
12.6.1. <i>SR</i> -триггер.....	892

12.6.2. Микросхемы SR-триггеров	897
12.6.3. D-триггер	898
12.6.4. Микросхемы из четырех и восьми D-триггеров	901
12.6.5. JK-триггер	902
12.6.6. Практические аспекты синхронизации триггеров	908
12.6.7. Цифровые генераторы сигнала тактирования и генераторы одиночных импульсов	910
12.6.8. Схемы для выполнения автоматического сброса при подаче питания	915
12.6.9. Повышающие и понижающие резисторы	917
12.7. Микросхемы счетчиков	918
12.7.1. Микросхемы асинхронных (со сквозным переносом) счетчиков	919
12.7.2. Микросхемы синхронных счетчиков	921
12.7.3. Замечание по счетчикам с дисплеями	928
12.8. Сдвиговые регистры	929
12.8.1. Сдвиговые регистры с последовательным вводом и последовательным выводом	930
12.8.2. Сдвиговые регистры с последовательным вводом и параллельным выводом	930
12.8.3. Сдвиговые регистры с параллельным вводом и последовательным выводом	931
12.8.4. Кольцевой счетчик	932
12.8.5. Счетчик Джонсона	932
12.8.6. Микросхемы сдвиговых регистров	933
12.8.7. Простые приложения с использованием сдвигового регистра	938
12.9. Аналого-цифровой интерфейс	941
12.9.1. Активирование простых логических откликов аналоговыми сигналами	941
12.9.2. Управление внешней нагрузкой посредством выхода логического устройства	943
12.9.3. Аналоговые переключатели	945
12.9.4. Аналоговые мультиплексоры-демультиплексоры	946
12.9.5. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразования	947
12.9.6. Аналого-цифровое преобразование	955
12.10. Дисплеи	958
12.10.1. Светодиодные индикаторы	958
12.10.2. Жидкокристаллические дисплеи	963
12.11. Устройства хранения данных	976
12.11.1. Постоянные запоминающие устройства	977
12.11.2. Простое ПЗУ на диодах	978
12.11.3. Размер и организация памяти	979
12.11.4. Простое программируемое ПЗУ	979
12.11.5. Устройства постоянной памяти	980
12.11.6. Устройства оперативной памяти	984
Глава 13. Микроконтроллеры	993
13.1. Базовая организация микроконтроллера	994
13.2. Примеры микроконтроллеров	995
13.2.1. Микроконтроллер ATtiny85	995
13.2.2. Микроконтроллеры семейства PIC16Cxx	1000
13.2.3. 32-разрядные микроконтроллеры	1015
13.2.4. Цифровая обработка сигналов	1015
13.3. Демонстрационные и макетные платы	1016
13.4. Платформа Arduino	1017
13.4.1. Обзор платформы Arduino	1017
13.4.2. Интегрированная среда разработки Arduino	1018
13.4.3. Модели плат Arduino	1019
13.4.4. Шилды	1020
13.4.5. Библиотека на языке C для платформы Arduino	1021
13.4.6. Пример проекта Arduino	1024
13.4.7. Использование только самого микроконтроллера	1026
13.5. Сопряжение внешних устройств с микроконтроллерами	1027
13.5.1. Подключение переключателей к микроконтроллеру	1028
13.5.2. Аналоговые входы	1032
13.5.3. Управление мощными нагрузками на цифровых выходах	1033

13.5.4. Аудиоинтерфейсы для микроконтроллера	1038
13.5.5. Последовательные интерфейсы микроконтроллеров	1040
13.5.6. Преобразование уровней	1047
13.5.7. Интерфейсы светодиодных индикаторов	1048
Глава 14. Программируемые логические схемы	1053
14.1. Программируемые логические схемы	1054
14.2. Устройства FPGA	1055
14.3. Средство разработки ISE и плата разработчика Elbert V2	1057
14.3.1. Установка программы ISE	1057
14.4. Плата разработчика Elbert V2	1058
14.4.1. Установка программного обеспечения платы Elbert V2	1059
14.5. Загрузка кода примеров	1060
14.6. Создание логической схемы устройства на микросхеме FPGA	1060
14.6.1. Пример 1: селектор данных	1060
14.6.2. Пример 2: четырехразрядный счетчик со сквозным переносом	1070
14.7. Язык Verilog	1072
14.7.1. Модули	1072
14.7.2. Провода, регистры и шины	1072
14.7.3. Параллельное исполнение	1073
14.7.4. Представление чисел	1073
14.8. Описания разработки устройства на FPGA на языке Verilog	1073
14.8.1. Реализация селектора данных на языке Verilog	1073
14.8.2. Создание счетчика со сквозным переносом с помощью языка Verilog	1076
14.9. Модульная конструкция	1078
14.9.1. Модульная конструкция на примере разработки счетчика-дешифратора	1078
14.9.2. Мультиплексированный семисегментный счетчик-дешифратор	1082
14.9.3. Параметризованные модули	1085
14.10. Эмуляция	1086
14.11. Язык VHDL	1088
Глава 15. Электрические двигатели	1089
15.1. Электрические двигатели постоянного тока	1089
15.2. Управление скоростью электродвигателей постоянного тока	1090
15.3. Направление вращения электродвигателя постоянного тока	1092
15.4. Дистанционно управляемые сервоприводы	1094
15.5. Шаговые двигатели	1097
15.6. Типы шаговых двигателей	1098
15.7. Управление шаговыми двигателями	1100
15.8. Управление драйверами шагового двигателя с помощью транслятора	1102
15.9. Идентификация шаговых двигателей	1105
Глава 16. Аудиоэлектроника	1107
16.1. Звук и его характеристики	1107
16.2. Микрофоны	1109
16.2.1. Динамический микрофон	1109
16.2.2. Конденсаторный микрофон	1110
16.2.3. Электретный микрофон	1110
16.2.4. Характеристики микрофонов	1111
16.3. Аудиоусилители	1111
16.3.1. Инвертирующий усилитель	1111
16.3.2. Неинвертирующий усилитель	1112
16.3.3. Цифровые усилители	1113
16.3.4. Снижение уровня фона в аудиоусилителях	1114
16.4. Предусилители	1115
16.5. Схемы микшеров	1115
16.6. Согласование импедансов	1116
16.7. Громкоговорители	1116
16.8. Разделительные фильтры для громкоговорителей	1118
16.9. Простые микросхемы аудиоусилителей	1120

16.10. Устройства для генерирования аудиосигналов.....	1121
16.11. Примеры схем разнообразных аудиоустройств	1121
Глава 17. Электронные модули.....	1125
17.1. Специализированные микросхемы	1125
17.2. Платы расширения и подключаемые модули	1126
17.2.1. Радиомодули	1128
17.2.2. Аудиомодули.....	1130
17.3. Модульные прототипы	1130
17.4. Открытое аппаратное обеспечение	1132
Приложение 1. Распределение электроэнергии и домашняя электропроводка	1135
П1.1. Распределение электроэнергии.....	1135
П1.2. Принцип работы трехфазного электроснабжения	1136
П1.3. Домашняя электропроводка.....	1138
П1.4. Электричество в других странах	1140
Приложение 2. Анализ погрешностей.....	1143
П2.1. Абсолютная, относительная и процентная погрешности.....	1143
П2.2. Оценка погрешности	1144
Приложение 3. Полезные факты и формулы	1147
ПЗ.1. Греческий алфавит.....	1147
ПЗ.2. Префиксы степеней числа 10 для единиц измерения	1147
ПЗ.3. Линейные функции ($y = kx + b$).....	1147
ПЗ.4. Квадратное уравнение ($y = ax^2 + bx + c$)	1148
ПЗ.5. Показательные и логарифмические функции	1148
ПЗ.6. Тригонометрия	1149
Функции синуса и косинуса	1149
ПЗ.7. Комплексные числа	1150
ПЗ.8. Дифференциальное исчисление	1150
ПЗ.9. Интегральное исчисление	1152
Предметный указатель	1155

ОБ АВТОРАХ

Пауль Шерц (Paul Scherz) в настоящее время работает менеджером по эксплуатации систем. Он окончил Университет штата Висконсин по специальности "Физика". Пауль — изобретатель-любитель в области электроники; понять ценность этого предмета ему помогла его работа на факультете ядерной техники и технической физики и на факультете физики плазмы.

Доктор Саймон Монк (Simon Monk) имеет степень бакалавра по кибернетике и вычислительной технике и докторскую степень по разработке программного обеспечения. Саймон посвятил несколько лет академической деятельности, а затем возвратился к работе в промышленности, став соучредителем компании Momote Ltd. по разработке программного обеспечения для мобильных устройств. Он активно занимался электроникой с раннего подросткового возраста, а в настоящее время постоянно пишет книги о любительской электронике и открытом аппаратном обеспечении. Авторству доктора Монка принадлежат многочисленные книги по электронике, включая "Programming Arduino" ("Программируем Arduino"), "Hacking Electronics" ("Хакерство электроники") и "Programming the Raspberry Pi" ("Программирование Raspberry Pi").

О ТЕХНИЧЕСКИХ РЕДАКТОРАХ

У **Майкла Марголиса** (Michael Margolis) за плечами 40-летний опыт разработки и внедрения аппаратных и программных решений. Он работал на высоких руководящих должностях в компаниях Sony, Lucent/Bell Labs, а также в нескольких стартап-компаниях. Майкл является автором двух книг — "Arduino Cookbook" ("Рецепты для Arduino") и "Make an Arduino-Controlled Robot: Autonomous and Remote-Controlled Bots on Wheels" ("Собери робота под управлением Arduino: автономные и дистанционно управляемые колесные роботы").

Крис Фитцер (Chris Fitzer) по профессии архитектор решений и технический руководитель. Он обладатель докторской степени по электротехнике и электронике и диплома бакалавра наук с отличием первого класса, которые он получил в Институте науки и техники при Манчестерском университете в 2003 и 1999 гг., соответственно. В настоящее время Крис руководит огромной командой, разрабатывая и внедряя технологии Smart Grid по всему миру. До этого он занимался продвижением стандарта ZigBee Smart Energy Profile в Европе, а также руководил разработкой первого в мире сертифицированного интеллектуального счетчика электричества Smart Energy In-Premise Display (IPD) и созданием его прототипа. Он также является автором и соавтором множества статей в технических журналах в области активно-адаптивных интеллектуальных электрических сетей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы хотим выразить благодарность многим людям, которые оказывали нам помощь при создании этой книги. Особые благодарности причитаются техническим редакторам Майклу Марголису (Michael Margolis), Крису Фитцеру (Chris Fitzer) и Дейвиду Бакли (David Buckley). Мы смогли исправить и уточнить материал книги благодаря очень подробному и полезному списку ошибок и опечаток для второго издания, который был составлен Мартином Лигаре (Martin Ligare) из Бакнельского университета (Bucknell University). В этом ему помогли Стив Бэйкер (Steve Baker, аспирантура военно-морского флота США — Navy Postgraduate School), Джордж Каплан (George Caplan, Колледж Уэллсли — Wellesly College), Роберт Дремел (Robert Drehmel), Ел Моррис (Earl Morris), Роберт Стрельчик (Robert Strzelczyk) — все из компании Motorola, Ллойд Лоу (Lloyd Lowe, Университет штата (Айдахо) в Бойсе — Boise State University), Перри Спринг (Perry Spring, Общинный колледж в Каскадия — Cascadia Community College), Майкл Б. Аллен (Michael B. Allen), Джеффри Одия (Jeffrey Audia) и Кен Боллинджер (Ken Ballinger) — Европейский институт инновации и технологии (European Institute of Innovation and Technology), Клемент Джэкоб (Clement Jacob), Джэми Мэстэрс (Jamie Masters) и Марко Ариано (Marco Ariano). Спасибо всем вам за ваши усилия и время, затраченные на улучшение этой книги. Также выражаем большую благодарность Майклу МакКэйбу (Michael McCabe), безгранично терпеливой Апоорве Гоэль (Apoorva Goel) и всем из издательства McGraw-Hill Education за их поддержку и мастерство в превращении этой рукописи в замечательную книгу.

— *Пауль Шерц (Paul Scherz) и Саймон Монк (Simon Monk)*

ВВЕДЕНИЕ

Изобретатели в области электроники обладают знаниями, интуицией, творческим подходом и техническими навыками, необходимыми для воплощения своих идей в реальные электронные устройства. Мы надеемся, что эта книга научит вас интуитивно понимать теоретические и практические аспекты электроники, содействуя вашей креативности. Эта книга предназначена начинающим изобретателям. Для изучения излагаемого в ней материала предполагаются минимальные знания электроники или вообще отсутствие таковых. Именно поэтому для преподавателей, студентов и начинающих любителей она будет хорошим источником базовых знаний. В то же самое время она может служить полезным ресурсом для техников и более опытных мастеров.

Примечания к четвертому изданию

В четвертом издании добавлена новая глава по программируемым логическим схемам. В ней основное внимание уделяется схемам FPGA (Field Programmable Gate Array — программируемая вентильная матрица) и рассматривается программирование демонстрационной платы со схемой FPGA с применением для этого редактора схем и языка HDL Verilog (hardware definition language — язык описания аппаратного обеспечения). В четвертом издании также осуществлены множественные мелкие обновления и исправлены ошибки, обнаруженные в третьем издании. Кроме этого, из него был удален устаревший материал, который больше не существует в современной электронике.

Введение в электронику

Возможно, самая большая трудность, с которой сталкиваются желающие изучать электронику, — это решить, что именно им нужно изучать. Какие предметные области следует охватить и в каком общем порядке проходить их? Хорошей отправной точкой для получения ответов на эти вопросы будет рис. 1.1. На нем дан общий обзор основных элементов, используемых при разработке практических электронных устройств, и представлена информация, содержащаяся в книге. В данной главе дается общее описание этих основных элементов.

Всё начинается с теории (см. слева). Сюда входят знания о напряжении, токе, сопротивлении, емкости, индуктивности, а также разных законов и теорем, которые помогают рассчитать напряжение и определить силу тока в цепях. По мере освоения базовой теории представляются основные пассивные компоненты, такие как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и трансформаторы, а затем схемы, составленные из отдельных пассивных элементов. В число *схем на дискретных пассивных элементах* входят токоограничивающие схемы, делители напряжения, фильтры, аттенюаторы и т. п. Сами по себе эти схемы не представляют большого интереса, но они являются необходимыми компонентами более сложных схем.

После изучения пассивных компонентов и схем на них переходим к *дискретным активным устройствам* из полупроводниковых материалов. Это, в основном, такие устройства, как диоды (клапаны, пропускающие ток только в одном направлении) и транзисторы (управляемые электрическим током переключатели/усилители).

Освоив дискретные активные устройства, переходим к изучению *схем на дискретных активных и пассивных компонентах*. В число таких схем входят выпрямители (преобразователи переменного тока в постоянный), усилители, вибраторы, модуляторы, миксеры и стабилизаторы напряжения. Вот здесь и начинается самая интересная часть.

В процессе изучения электроники вы получите знания о различных устройствах ввода-вывода (преобразователях). Устройства ввода (датчики) преобразуют физические сигналы, такие как звук, свет и давление, в электрические сигналы, которые могут обрабатываться электронными схемами. В число этих устройств входят микрофоны, фототранзисторы, переключатели, клавиатуры, термисторы, тензометры, генераторы и антенны. Устройства вывода преобразуют электрические сигналы в физические действия. Это, например, лампы, светодиодные и жидкокристаллические дисплеи, динамики, зуммеры, двигатели (постоянного тока, сервоприводы и шаговые), соленоиды и антенны. Устройства ввода-вывода позволяют осуществлять взаимодействие между людьми и схемами.

Чтобы облегчить жизнь разработчиков схем, производители создали интегральные схемы (ИС), содержащие множество дискретных схем (наподобие упомянутых ранее) на крошечном кристалле кремния. Кристалл обычно помещается в пластмас-

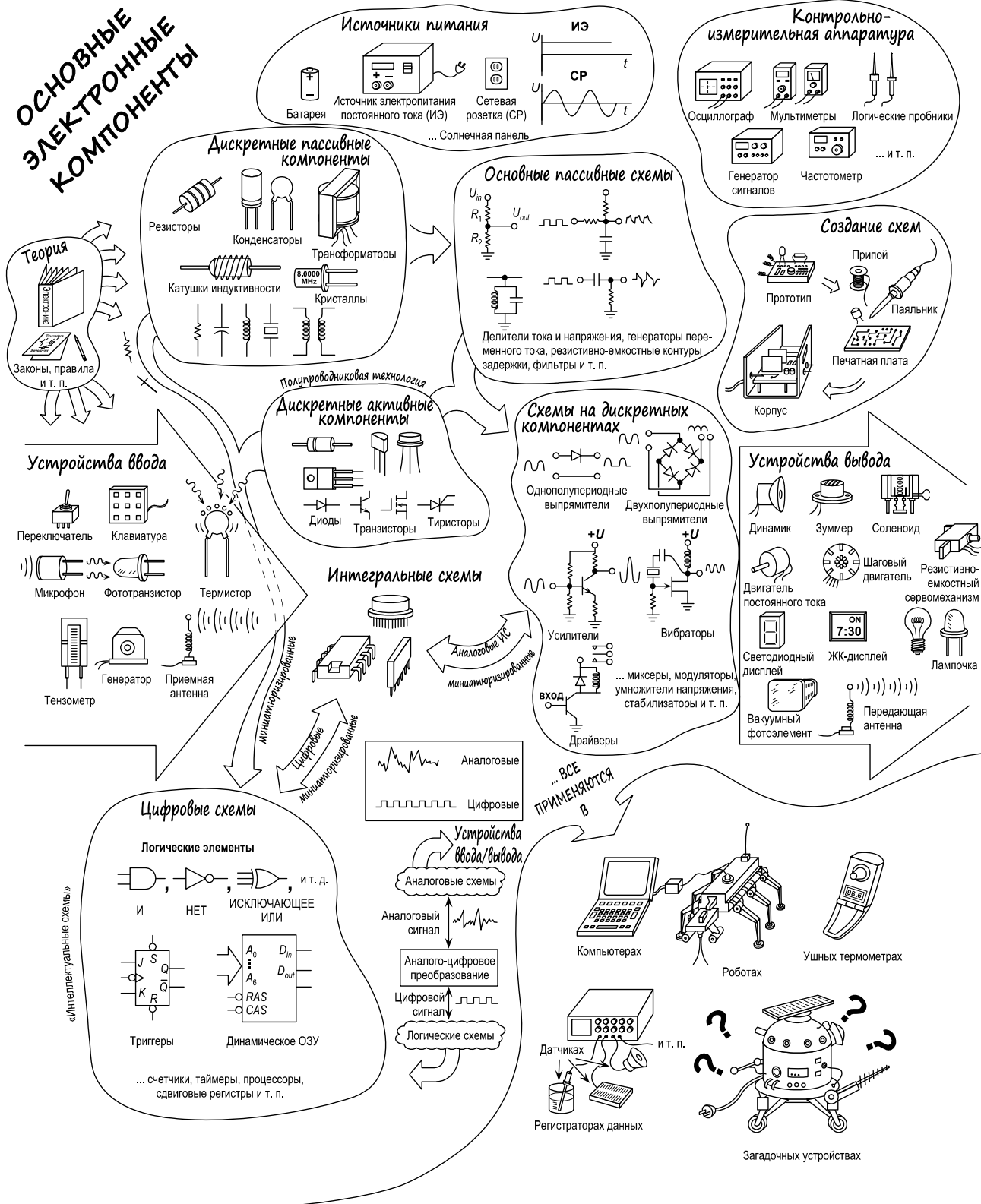


РИС. 1.1. Основные элементы для электронных устройств

совый корпус с металлическими контактами, к которым подключаются выводы, содержащиеся в кристалле схем. Знание интегральных схем является обязательным для любого разработчика практических схем. Такие ИС, как усилители и стабилизаторы напряжения, называются *аналоговыми*; это означает, что они реагируют на сигналы варьирующегося напряжения и выдают их. В отличие от аналоговых, *цифровые* ИС работают только с сигналами двух уровней напряжения: *высоким* (обычно +5 В) и *низким* (обычно 0 В). Использование только двух уровней напряжения объясняется тем, что это значительно упрощает обработку и хранение данных (чисел, букв, других символов и управляющей информации). Процесс кодирования информации в сигналы, которые могут использоваться цифровыми схемами, заключается в сочетании битов (нулей и единиц, выражаемых низким и высоким уровнем напряжения, соответственно) в "слова" с однозначным значением. Значение таких слов в конкретной схеме определяется разработчиком. В отличие от аналоговой электроники, в цифровой электронике используется совершенно другой набор компонентов, которые основаны на интегральных схемах.

В цифровой электронике используется огромное количество специализированных ИС. Одни из этих ИС предназначены для выполнения логических операций с входными данными, другие для ведения счета, а третьи — для хранения информации, которую можно извлечь в дальнейшем. В число цифровых ИС входят логические вентили, триггеры, сдвиговые регистры, счетчики, запоминающие устройства, процессоры и т. п. Цифровые схемы позволяют дать "мозги" электронным устройствам. Для обеспечения взаимодействия цифровых схем с аналоговыми применяются специальные схемы для преобразования аналоговых сигналов в цифровые, т. е. в наборы значений 1 и 0. А для обратного взаимодействия используются схемы для преобразования цифровых сигналов в аналоговые, т. е. строк значений 1 и 0 в уровни напряжения.

Получив основные знания в области цифровой электроники, вы сможете с их помощью исследовать мир микроконтроллеров. Последние представляют собой программируемые цифровые микросхемы, которые под управлением заложенной в них программы могут считывать входные значения с датчиков и управлять устройствами вывода с помощью сигналов на контактах ввода-вывода.

Но теория без практики мертва, поэтому нам также нужно научиться интерпретировать принципиальные схемы, создавать прототипы устройств на беспаячных макетных платах, тестировать эти прототипы (используя многофункциональные измерительные приборы — так называемые мультиметры, осциллографы и логические пробники), модифицировать их (если необходимо) и, наконец, создавать конечные схемы, используя разные инструменты и специальные печатные платы.

В следующей главе мы приступим к первому этапу изучения электроники — освоению ее теории.

Теория

2.1. Теоретические основы электроники

В этой главе рассматриваются основные понятия электроники — ток, напряжение, сопротивление, электрическая энергия, емкость и индуктивность.

После изложения этих концептов иллюстрируется математическое моделирование протекания тока через основные электронные компоненты — резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности — и воздействие его напряжения на них. В главе представлены методы анализа сложных цепей, содержащих резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности, на которые и подается питание, с помощью фундаментальных законов и теорем, таких как закон Ома, законы Кирхгофа и теорема Тевенина. Как мы увидим далее, для питания этих цепей применяются источники питания трех основных типов — постоянного тока, переменного тока (включая синусоидальные и несинусоидальные периодические источники), а также несинусоидальные апериодические источники. Мы также рассмотрим цепи с переходными процессами, в которых наблюдаются резкие изменения состояния (например, при изменении положения переключателя). В конце главы предложена методика анализа цепей, содержащих нелинейные компоненты (диоды, транзисторы, интегральные схемы).

Тем, кто делает свои первые шаги в электронике, рекомендуется использовать программу эмулирования. Одна из таких программ, онлайнное средство CircuitLab (www.circuitlab.com), имеет удобный интерфейс и проста в использовании. В Интернете также легко найти онлайнные калькуляторы, которыми можно воспользоваться для выполнения многих расчетов, выполняемых в этой главе. Использование программы-эмулятора в процессе изучения материала главы поможет вам закрепить свои знания, одновременно способствуя развитию интуитивного понимания поведения схем. Но имейте в виду, что эмуляторы могут давать обманчивые результаты или, по крайней мере, результаты, которые кажутся обманчивыми, если вы не понимаете все параметры, необходимые для создания реалистической эмуляции. Поэтому всегда важно поработать руками — вытащить безопасные макетные платы, провода, резисторы, источники питания и т. п. и воплотить схемы физически. Именно на этом этапе приобретается наибольший объем практических знаний, необходимых изобретателю.

Важно иметь в виду, что рассматриваемые в этой главе компоненты объясняются только теоретически. Например, для конденсаторов мы изучим принципы их работы, ознакомимся с основными уравнениями, описывающими их поведение в определенных условиях, а также рассмотрим другие различные основные методы для предсказания основных аспектов поведения конденсаторов. Но это не даст вам глубинного понимания конденсаторов, таких как их практическое применение (в фильтрах, гасителях колебаний, вибраторах и т. п.), знания разных типов конденсаторов и различия между ними в аспекте неидеальных характеристик, а также

какие конденсаторы лучше всего подходят для определенного приложения и, самое главное, как расшифровывать маркировки конденсаторов. Для этого вам нужно будет обратиться к *разд. 3.6*, который специально предназначен для этих тем. Этот же подход применяется и к другим компонентам, которые рассматриваются в теоретической части книги.

Теоретическая и практическая информация о трансформаторах и нелинейных устройствах, таких как диоды, транзисторы и аналоговые и цифровые интегральные схемы, в этой главе не предоставлена. Трансформаторы подробно рассматриваются в *разд. 3.8*, а различные нелинейные устройства обсуждаются индивидуально в остальных главах книги.

Небольшой совет — если математический материал в этой главе начинает выглядеть угрожающе, пусть вас это не волнует. Большая часть сложного математического материала используется для доказательства, например, какой-либо теоремы или закона или чтобы дать вам представление о том, с какими трудностями нужно будет иметь дело, если не применять математические приемы для их упрощения. Но в действительности для разработки большинства схем необходимо знать на удивление небольшой объем математики; по сути, может оказаться, что вы сможете обойтись лишь знаниями элементарной алгебры. Поэтому, когда вы начнете теряться в определенном математическом материале в каком-либо разделе этой главы, пропустите данный материал и продолжайте с того места, где формулы, правила и другие математические выкладки более легко поддаются вашему пониманию. И помните, чтобы разрабатывать хорошие схемы, не обязательно нужно быть математическим гением.

2.2. Электрический ток

Электрический ток — это общий заряд, проходящий через определенную площадь поперечного сечения S за единицу времени. Данная площадь поперечного сечения может представлять диск, помещенный в газовую, плазменную или жидкостную среду, но в электронике эта область чаще всего представляет сечение через монолитный материал, например, проводник.

Если через площадь S за интервал времени Δt проходит заряд величиной Δq , тогда *средний ток* $I_{\text{ср}}$ определяется как (рис. 2.1):

$$I_{\text{ср}} = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

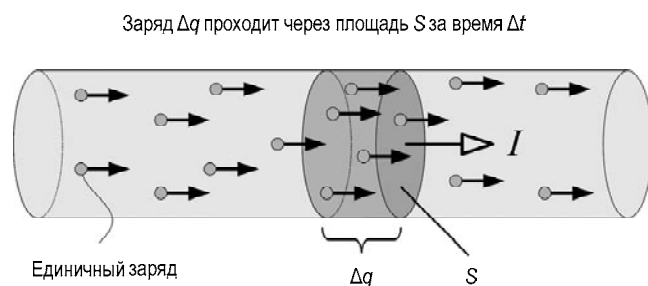


РИС. 2.1. Средний ток, проходящий через площадь поперечного сечения

Если величина тока меняется во времени, *мгновенный ток* I определяется через предел, когда $\Delta t \rightarrow 0$. Таким образом, ток является мгновенной скоростью прохождения заряда через площадь:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}. \quad (2.1)$$

Единица измерения тока — кулоны в секунду, которая также называется *ампером* (А), в честь французского физика Андре Мари Ампера (Andre-Marie Ampere):

$$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с.}$$

Поскольку ампер представляет довольно сильный ток, сила тока также часто указывается в *миллиамперах* ($1 \text{ мА} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ А}$), *микроамперах* ($1 \text{ мкА} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ А}$) и *наноамперах* ($1 \text{ нА} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ А}$).

В проводниках, например меди, электрический ток состоит из свободных *электронов*, перемещающихся в решетке атомов меди. На каждый атом меди приходится один свободный электрон. Заряд одного электрона определяется следующей формулой:

$$q_{\text{электрон}} = (-e) = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (2.2a)$$

Это заряд такой же величины, как заряд одного атома железа, только обратной полярности. (Положительный заряд образуется в результате отдачи атомом железа одного электрона в "облако" электронов, хаотически перемещающихся в решетке. Потеря атомом одного электрона означает, что число его протонов на один больше, чем число электронов.) Заряд одного *протона* определяется следующей формулой:

$$q_{\text{протон}} = (+e) = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (2.2b)$$

Проводник в общем имеет нейтральный заряд, поскольку число его электронов равно числу протонов. Из уравнения (2.2a) можно видеть, что если через медный провод протекает ток силой в 1 А, количество электронов, протекающих через поперечное сечение провода за 1 секунду, равно:

$$1 \text{ А} = \left(\frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} \right) \left(\frac{\text{электрон}}{-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} \right) = -6,24 \cdot 10^{18} \text{ электронов/с.}$$

Но у нас имеется проблема с этим результатом. А именно, каким образом мы получили отрицательное количество электронов, протекающих в секунду? Это можно объяснить только двумя способами — или электроны должны двигаться в направлении, противоположном указанному току, или же вместо электронов в проводник должны входить положительные заряды. Второе объяснение будет неправильным, поскольку экспериментальным способом было доказано, что перемещаться могут только электроны, а не положительные заряды, которые зафиксированы в решетчатой структуре проводника. (Но обратите внимание на тот факт, что существуют среды, в которых возможно протекание положительного заряда, например, положительный поток ионов в жидкостях, газах и плазмах.) Оказывается, что первый вариант — электроны движутся в направлении, противоположном установленному направлению тока — будет правильным ответом.

Давным-давно, когда Бенджамин Франклин (которого часто считают отцом электроники) занимался своими новаторскими опытами в ранней электронике, он присвоил положительный знак заряда загадочным (в то время) элементам, которые перемещались по проводнику, выполняя при этом работу. Некоторое время спустя, физик по имени Джозеф Томсон провел эксперимент, в котором изолировал эти загадочные перемещающиеся заряды. Но для того чтобы осуществлять измерения в своих экспериментах и записывать их, а также выполнять вычисления, Томсон был вынужден использовать единственные доступные ему законы — те, которые были сформулированы на основе движения положительных зарядов Франклина. Но движущиеся заряды, открытые Томсоном (которые он назвал *электронами*), двигались в направлении, обратном движению условного тока, которое использовалось в предыдущих уравнениях, или, иными словами, двигались против течения. Эта ситуация графически представлена на рис. 2.2.

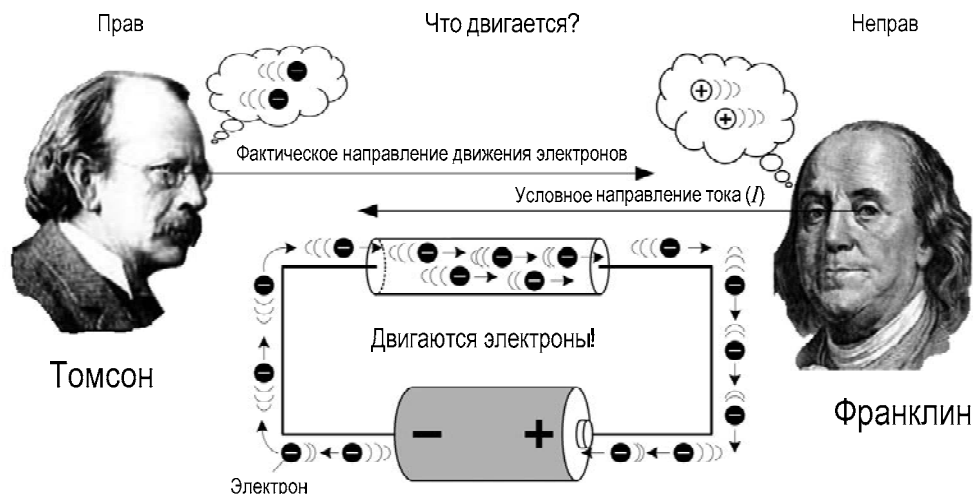


РИС. 2.2. Томсон изменил утверждение, впервые высказанное Бенджаминем Франклином, что в проводниках движутся положительные заряды. Но поскольку движение электронов в одном направлении эквивалентно движению положительных зарядов в противоположном направлении, старые формулы по-прежнему работают. Так как мы применяем старые формулы, с практической точки зрения будет полезным использовать условное направление тока, предложенное Франклином, но при этом не забывать, что в действительности движутся электроны и в противоположном направлении

Какую важность это имеет для тех, кого не особо интересует подробная физика и прочие подобные вещи? Скажем так, не большую. Вы можете вообразить, что по проводам и различным электрическим устройствам движутся положительные заряды, и все будет работать чудесным образом, поскольку движение отрицательных электронов в одном направлении эквивалентно движению положительных зарядов в противоположном. Собственно говоря, все формулы в области электроники (например, закон Ома — $U = IR$) "делают вид", что ток I составляют носители положительного заряда. Эта условность всегда будет с нами. Одним словом, нам удобнее считать, что движутся положительные заряды. Поэтому, когда вы видите выражение "*поток электронов*", обязательно имейте в виду, что условный ток I протекает в противоположном направлении. Чуть позже мы рассмотрим, что происходит внутри проводника на микроскопическом уровне — это должно несколько прояснить ситуацию.

ПРИМЕР 1

Определить, сколько электронов проходит за 3 с через данную точку в проводнике, по которому протекает ток в 2 А (рис. 2.3).

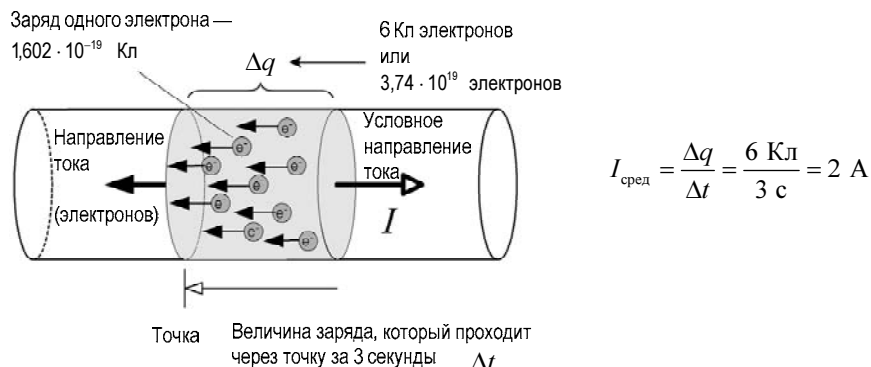


РИС. 2.3. Определение количества электронов, проходящих через сечение проводника за единицу времени

Решение. За 3 с через точку проходит заряд следующей величины:

$$\Delta q = I \cdot \Delta t = (2 \text{ А})(3 \text{ с}) = 6 \text{ Кл.}$$

Заряд одного электрона равен $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, поэтому заряд 6 Кл электронов будет:

$$\text{Количество электронов} = \frac{6 \text{ Кл}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 3,75 \cdot 10^{19}.$$

ПРИМЕР 2

Заряд в схеме меняется во времени по формуле $q(t) = (0,001 \text{ Кл}) \sin[(1000 \text{ с}^{-1})t]$.

Вычислить мгновенный ток.

Решение. Подставив в уравнение

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}[(0,001 \text{ Кл}) \sin(1000 \text{ с}^{-1} \cdot t)] = (0,001 \text{ Кл})(1000 \text{ с}^{-1}) \cos(1000 \text{ с}^{-1} \cdot t) = \\ = \cos(1000 \text{ с}^{-1} \cdot t) \text{ А}$$

конкретное время, мы получим мгновенный ток для этого времени. Например, для $t = 1$ мгновенный ток будет 0,174 А. А для $t = 3$ с ток будет $-0,5$ А. Знак "минус" (–) указывает, что ток протекает в обратном направлении вследствие его синусоидальной природы.

Примечание

Для решения последнего примера потребовалось применить высшую математику, с основными сведениями по которой можно ознакомиться в *приложении 2*. К счастью, как мы увидим, в действительности нам придется очень редко использовать единицы заряда в вычислениях по электронике. Обычно нам нужно беспокоиться только о токе, который можно измерить напрямую посредством амперметра или вычислить, используя формулы, не требующие никакой высшей математики.

2.2.1. Токи с разных точек зрения

Что можно считать сильным или слабым током? Приступая к работе с электронными устройствами, хорошо бы иметь ответ на этот вопрос. В табл. 2.1 приводятся несколько примеров потребления тока разными устройствами.

Таблица 2.1. Устройства и их потребляемый ток

Устройство	Потребляемый ток
Лампочка накаливания, 100 Вт	Около 1 А
Микроволновая печь	От 8 до 13 А
Ноутбук компьютер	От 2 до 3 А
Электрический вентилятор	1 А
Телевизор	От 1 до 3 А
Тостер	От 7 до 10 А
Лампа дневного света	От 1 до 2 А
Радио/стерео	От 1 до 4 А
Типичный светодиод	20 мА
Мобильный телефон (смартфон) в режиме работы в Интернете	Около 200 мА
Продвинутая микросхема с низким энергопотреблением	От нескольких микроампер до нескольких пикоампер
Стартер автомобиля	Около 200 А
Молния	Около 1000 А
Ток, достаточный, чтобы вызвать остановку сердца или дыхания	От 100 мА до 1 А

2.3. Напряжение

Чтобы заставить электрический ток протекать от одной точки к другой, между этими точками должно быть напряжение. Прилагаемое к концам проводника напряжение создает *электродвижущую силу* (ЭДС), которая приводит в движение все свободные электроны в проводнике.

Но прежде чем продолжить, сделаем одно техническое замечание — *напряжение* также называется *разностью потенциалов* или просто *потенциалом*. Все эти термины означают одно и то же понятие. Но использование последних двух терминов будет избегаться в этой книге, потому что их легко перепутать с понятием *потенциальной энергии*, а это совсем другое понятие.

На рис. 2.4 показана схема фонарика, состоящая из батарейки, подключаемой к лампочке двумя проводами через выключатель. Когда выключатель разомкнут (выключен), ток в цепи не будет протекать. Но как только выключатель замыкается, его сопротивление падает почти до нуля, замыкая цепь и позволяя напряжению батарейки воздействовать на нее. Создаваемая этим напряжением ЭДС приводит в движение все свободные электроны по всей цепи в направлении от отрицательного потенциала батарейки к положительному. Условное направление движения тока, конечно же, противоположно движению электронов (см. материал о Бенджамине Франклине).

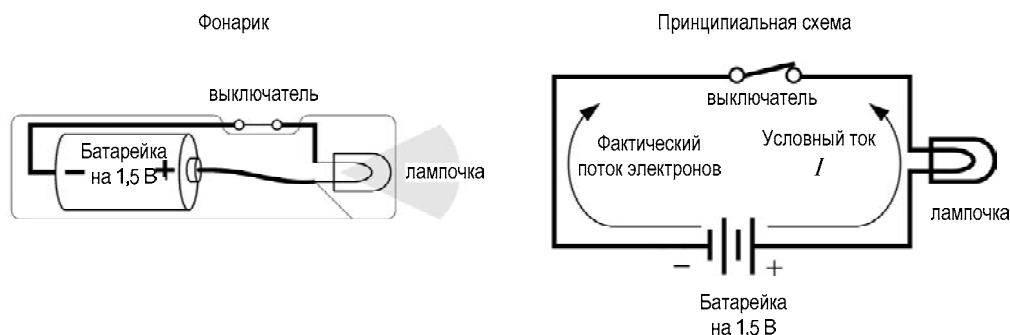


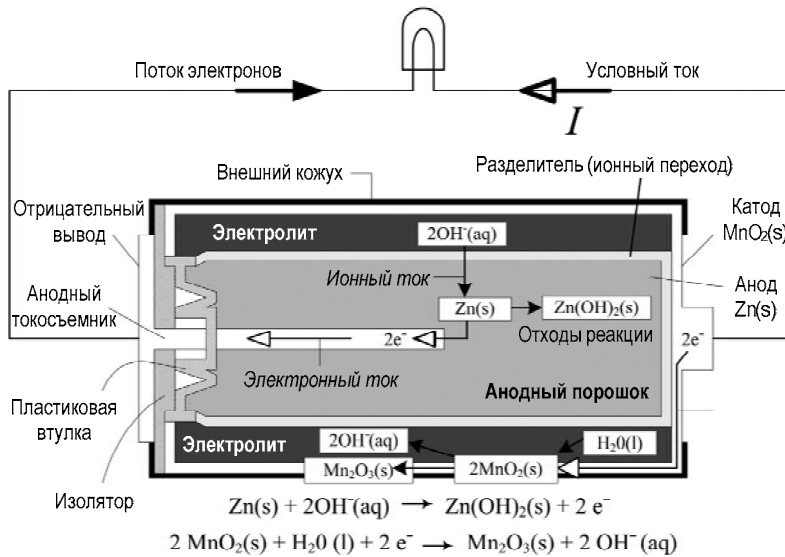
РИС. 2.4. Протекание тока в простой схеме фонарика

Важно отметить, что для батарейки необходима остальная часть цепи, как и для остальной части цепи необходима батарейка. Химические реакции внутри батарейки могут протекать только при наличии связи между ее выводами. Эти химические реакции связаны с перемещением электронов, что согласно замыслу может происходить, только если между выводами батарейки (т. е. там, где находится цепь) есть связь. Этот процесс с использованием щелочной сухой батарейки показан на рис. 2.5. Обратите внимание, что направление тока одинаково на всем протяжении цепи, хотя природа тока разная на различных участках цепи — ионный ток внутри батарейки и электронный ток во всех других местах.

Под влиянием ЭДС, создаваемой прикладываемым напряжением, на свободные электроны нити накаливания лампочки последние получают дополнительную энергию, которая передается на атомы материала решетки нити накаливания. Здесь эта энергия преобразуется в тепло (вибрирование атомов материала нити накаливания) и сопутствующий свет (когда валентный электрон атома решетки возбуждается свободным электроном и связанный электрон возвращается на нижний энергетический уровень, испуская при этом фотон).

Устройство, поддерживающее постоянное напряжение на своих выводах, называется *источником напряжения постоянного тока* (или просто источником постоянного тока). Батарейка является примером источника постоянного тока. В принципиальных схемах батарея обозначается символом $\text{---}||\text{---}$.

а)



10^{17} реакций в секунду для тока в 0,100 А

б)

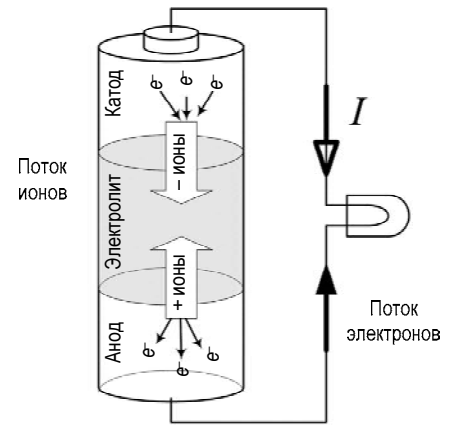


РИС. 2.5. Протекание тока в схеме фонарика на более глубоком уровне

2.3.1. Как возникает напряжение

Чтобы мысленно представить, как батарея создает ЭДС в цепи, мы представляем, что химические реакции внутри батареи вырабатывают свободные электроны, которые в большом числе быстро накапливаются в области отрицательного вывода (материал анода), создавая концентрацию электронов. Эта концентрация электронов насыщена отталкивающей силой (электроны отталкивают друг друга), которую можно рассматривать как тип "электрического давления". Когда между выводами батареи помещается нагрузка (например, лампочка, провода и выключатель нашего фонарика), электроны на отрицательном выводе батареи пытаются избежать этого давления, проникая в эту внешнюю цепь. Эти электроны повышают уровень концентрации свободных электронов в конце проводника, подсоединенного к отрицательному выводу. Даже небольшая процентная разница в концентрации свободных электронов в одной области создает мощную силу отталкивания между свободными электронами. Эта сила отталкивания выражается импульсом, кажущимся мгновенно распространяющимся по цепи (со скоростью, близкой к скорости света). Свободные электроны, находящиеся ближе всего к поступающим электронам, быстро отталкиваются в противоположном направлении, отталкивая следующие электроны, и т. д. вдоль всей цепи, создавая цепную реакцию или импульс. Этот импульс распространяется по проводнику со скоростью, приближающейся к скорости света. Такая ситуация графически представлена на рис. 2.6.

В действительности же средняя физическая скорость электронов намного ниже. Фактически, скорость дрейфа (общая средняя скорость движения электронов к положительному выводу) обычно равна долям миллиметра в секунду, например, 0,002 мм в случае тока в 0,1 А, протекающего по проводнику 12-го калибра¹. Это дрейфовое перемещение свободных электронов представляет собой ток, или более точно, условный ток I , который протекает в обратном направлении. (В действительности перемещение электронов является довольно сложным процессом,

¹ Около 2 мм по системе American Wire Gauge (Американский калибр проводов — действующая в США система обозначения диаметра проводов. См., например, https://ru.wikipedia.org/wiki/Американский_калибр_проводов). — Прим. пер.



РИС. 2.6. Перемещение электронов по цепи

с участием термических эффектов. Мы рассмотрим этот процесс более подробно в следующем разделе.)

Скорее всего, электроны, которые находятся "дальше" в проводнике, будут подвержены более слабой силе отталкивания, т. к. между ними и отрицательным выводом батареи будет значительный объем материала, который будет поглощать (посредством столкновений электронов друг с другом, взаимодействия свободных электронов со связанными электронами и т. п.) определенную часть силы отталкивания, исходящей из отрицательного вывода. Кроме этого, как вы уже, наверное, знаете, схемы могут содержать большое число компонентов, и некоторые из них могут быть зарыты глубоко внутри сложной сети электрических цепей. Можно представить, что в некоторых из этих цепей сила отталкивания сводится к минимальному значению. Такие области со слабой силой отталкивания отождествляются, как области низкого "электрического давления", или напряжения. Электроны в этих областях обладают очень низким рабочим потенциалом, у них низкая потенциальная энергия по сравнению с электронами, находящимися ближе к источнику электронов.

Напряжение представляет собой разность потенциальной энергии (E_n), которой обладает единица заряда в одной точке области "электрического давления" (создаваемого новыми электронами, подаваемыми в цепь) по сравнению с его пребыванием в другой точке этой области². Взаимоотношение между напряжением и разницей потенциальной энергии выражается формулой, приведенной на рис. 2.7.

$$U_{AB} = \frac{E_{AB}}{q} \text{ или } U_B - U_A = \frac{E_B - E_A}{q} \text{ или } \Delta U = \frac{\Delta E_n}{q}$$

РИС. 2.7. Взаимоотношение между напряжением и разницей потенциальной энергии между двумя точками

Определение *напряжения* подразумевает, что оно измеряется между двумя точками, например, *точкой А* и *точкой В*. Этим объясняется нижний индекс "AB" в выражении U_{AB} . Символы ΔU означают то же самое. Оба эти выражения подразумевают существование некой абсолютной шкалы, по которой в индивидуальных

² Еще из школьного курса физики известно: чтобы найти напряжение U на данном участке цепи, надо работу тока A разделить на заряд q , прошедший по этому участку: $U = A/q$. — *Ред.*

точках измеряется напряжение и ему присваивается конкретное значение. В электронике такую шкалу можно создать, выбрав какую-либо точку (часто, точку с самым низким электрическим давлением) и определив эту точку, как имеющую нулевое значение, или с опорным напряжением 0 В. Во многих схемах постоянного тока в качестве точки нулевого опорного напряжения выбирается отрицательный вывод источника питания, и эта точка обозначается символом заземления \perp (этот символ рассматривается более подробно далее). На практике напряжения редко обозначаются с использованием нижних индексов (U_{AB}) или знака дельты (ΔU). Вместо этого используется или просто символ U , или этот символ с нижним индексом, например, U_R . Но для "одионого" символа U всегда указываются две точки, напряжение на которых он обозначает. Во втором случае нижний индекс обозначает элемент, на котором измеряется напряжение. В данном примере это резистор (R — resistor). Ввиду этого, мы можем упростить выражение напряжения/потенциальной энергии, сведя его к следующему виду:

$$U = \frac{E_n}{q}$$

Но только обязательно помните, что переменные напряжения и потенциальной энергии представляют разницу между двумя точками. Как мы увидим далее, все важные законы в электронике обычно предполагают эту "чистую" форму переменных напряжения или потенциальной энергии.

В нашем примере с фонариком мы можем рассчитать разницу в потенциальной энергии электронов, один из которых исходит из отрицательного полюса батарейки напряжением 1,5 В, а другой входит в ее положительный полюс:

$$\Delta E_n = \Delta Uq = (1,5 \text{ В})(1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}) = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Обратите внимание, что эта формула дает нам *разницу потенциальной энергии* двух электронов, а не потенциальную энергию любого электрона — то ли исходящего из отрицательного полюса (E_1), то ли входящего в положительный полюс (E_0). Но если предположить, что потенциальная энергия электрона, входящего в положительный полюс, равна нулю, то относительную потенциальную энергию электрона исходящего из отрицательного полюса можно вычислить по следующей формуле:

$$E_1 = \Delta E_n + E_0 = \Delta E + 0 = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

ПРИМЕЧАНИЕ

Увеличение положительной потенциальной энергии может быть связано со сближением подобных зарядов друг с другом, а уменьшение — с их удалением друг от друга. Использование знака минуса перед зарядом электрона удалось избежать благодаря тому, что напряжения определяются положительным пробным зарядом. Мы попадаем в ситуацию, подобную ситуации с положительными зарядами Бенджамина Франклина. При условии, что мы рассматриваем потенциал относительно концентрации подаваемых электронов, все работает должным образом.

Для настоящей схемы, где батарея подает очень большое количество электронов — от сотен до тысяч триллионов, в зависимости от сопротивления проводника потоку электронов — результат предыдущих вычислений необходимо умножить на общее число входящих электронов. Например, если лампочка нашего фонарика потребляет 0,1 А, батарейка будет подавать в нее $6,25 \cdot 10^{17}$ электронов каждую секунду, а потенциальная энергия всех новых электронов будет около 0,15 Дж/с.

Но как насчет потенциальной энергии свободных электронов в других точках цепи, таких как нить накаливания, в положительном проводнике, отрицательном проводнике и т. п.? Можно сказать, что где-то в нити накаливания лампочки есть элек-

трон, потенциальная энергия которого равна половине потенциальной энергии свежего электрона, исходящего из отрицательного полюса батареи. Причиной этому является тот факт, что другие свободные электроны в проводнике потеряли энергию вследствие столкновений, что ослабляет электрическое отталкивающее давление, испытываемое нашим рассматриваемым электроном. В действительности, в схеме нашего электрического фонарика вся потеря электрического давления происходит в нити накаливания лампочки, когда энергия свободных электронов преобразуется в тепло и свет.

Что касается потенциальной энергии свободных электронов в проводниках, которыми лампочка подсоединена к батарейке, предполагается, что все электроны в одном и том же проводнике имеют одинаковую потенциальную энергию. Отсюда предполагается, что между любыми двумя точками одного и того же проводника напряжение отсутствует. Например, если поместить щупы вольтметра на любые две точки одного и того же проводника, он покажет 0 В (рис. 2.8).

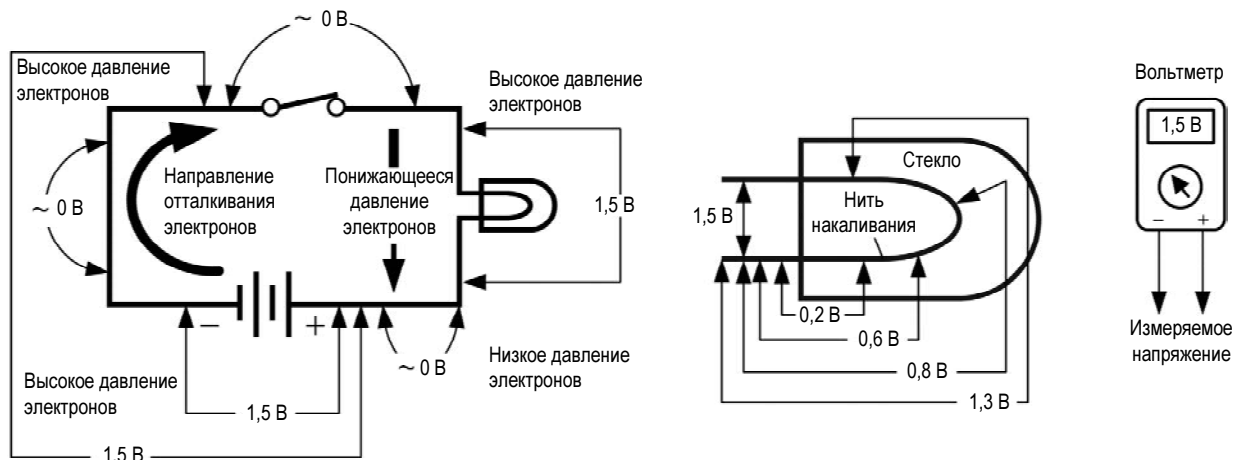


РИС. 2.8. Напряжение между разными точками проводника (слева) и нити накаливания (справа)

Для практических целей это предположение считается верным. Но в действительности это не так. Между двумя разнесенными точками одного и того же проводника все-таки происходит незначительное падение напряжения. Если бы у нас был чрезвычайно чувствительный вольтметр, мы бы смогли увидеть падение напряжения около 0,00001 В, в зависимости от длины проводника, силы тока и материала проводника. Причиной этому является внутреннее сопротивление проводника; эту тему мы рассмотрим чуть позже.

2.3.2. Определение вольта и обобщенный закон мощности

Настало время дать формальное определение единице измерения напряжения — вольту. Используя взаимоотношение между напряжением и разницей потенциальной энергии $U = E_{\text{п}}/q$, определяем вольт следующим образом:

$$1 \text{ вольт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}}, \quad 1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = \text{Дж/Кл}.$$

Две точки с напряжением 1 В между ними имеют достаточно "давления" для выполнения работы объемом в 1 Дж, перемещая заряд в 1 Кл между ними. Например, распространенная батарейка напряжением 1,5 В может переместить по схеме заряд в 1 кулон, совершая при этом 1,5 джоуля работы.

Вольт также можно определить в терминах мощности, что полезнее в электронике. *Мощность* представляет объем энергии, требуемой для питания схемы каждую се-

кунду. В соответствии с законом сохранения энергии можно сказать, что мощность, используемая для питания схемы, должна равняться мощности, используемой схемой для выполнения полезной работы, плюс потерянная мощность, например, тепло. Предполагая, что одиночный электрон теряет всю свою потенциальную энергию при прохождении через схему от отрицательного полюса к положительному, можно сказать, чисто теоретически, что вся эта энергия должна быть преобразована в работу — или полезную, или потерянную (тепло). По определению, математически мощность выражается формулой dW/dt . Заменяв W выражением потенциальной энергии $E_{\text{п}} = Uq$ и полагая постоянное напряжение (т. е. напряжение от батареи), получим следующее:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(Uq)}{dt} = U \frac{dq}{dt}.$$

Так как мы знаем, что ток $I = dq/dt$, то можем откорректировать предыдущее выражение соответствующим образом, получив:

$$P = UI. \quad (2.3)$$

Это выражение называется *обобщенным законом мощности*. Закон этот невероятно важный; он предоставляет общий результат, который не зависит ни от материала, ни от типа перемещения зарядов. Единица электрической мощности называется ватт (Вт); $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$, или, в пересчете на вольты и амперы, $1 \text{ Вт} = 1 \text{ ВА}$ (один ватт равен одному вольт-амперу).

Тогда в терминах мощности вольт определяется следующим образом:

$$1 \text{ вольт} = \frac{1 \text{ ватт}}{1 \text{ ампер}}, \quad 1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Вт}}{1 \text{ А}} = \text{Вт/А}.$$

С помощью обобщенного закона мощности можно определить потери мощности в любой схеме, зная только значение прилагаемого напряжения и потребляемого тока, которые можно выяснить, замерив их с помощью вольтметра и амперметра. Но таким способом мы не можем узнать, каким именно образом эта мощность используется; этот аспект мы обсудим, когда будем рассматривать сопротивление. Определение потери мощности в схеме с помощью обобщенного закона мощности иллюстрируется на рис. 2.9.

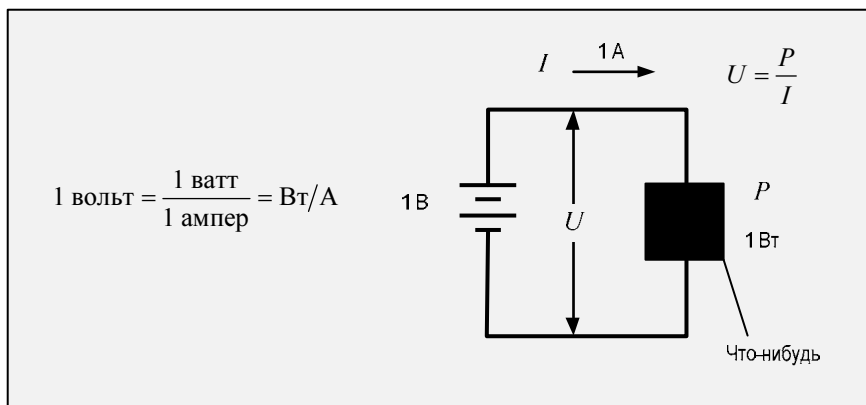


РИС. 2.9. Определение потери мощности в схеме

ПРИМЕР 1

Допустим, что наша схема фонарика потребляет 0,1 А тока при прилагаемом напряжении 1,5 В. Какой объем мощности потребляет схема?

Решение.

$$P = UI = (1,5 \text{ В})(0,1 \text{ А}) = 0,15 \text{ Вт}.$$

ПРИМЕР 2

В технических характеристиках устройства указано, что при питании 12 В оно потребляет 100 Вт мощности. Какой силы ток потребляет устройство?

Решение.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ Вт}}{12 \text{ В}} = 8,3 \text{ А.}$$

2.3.3. Соединение нескольких батареек

Чтобы повысить мощность источника питания, можно повысить его напряжение, соединив две батарейки последовательно (рис. 2.10).

Напряжение на соединенных таким образом батарейках равно сумме напряжений каждой батарейки. По сути, мы установили два "насоса" зарядов друг за другом, повысив таким образом создаваемое электрическое "давление". С точки зрения химии, если обе батарейки одинакового номинала, мы удваиваем количество химических реакций, что в свою очередь удваивает количество электронов, подаваемых в схему.

На рис. 2.10 используется понятие *опорной земли*, или опорного нулевого (0 В) напряжения, обозначаемого символом \perp . Хотя этот символ служит для обозначения физического заземления (определение которого дано немного дальше), его также можно использовать для указания точки, относительно которой измеряются напряжения во всех точках схемы. Логически, при создании шкалы измерений, ее самое низкое значение избирается в качестве нулевого. Для большинства схем постоянного тока точка опорной земли обычно устанавливается на отрицательном выводе источника напряжения. Понятию точки опорной земли сопутствует понятие *напряжения в точке*, которое представляет собой напряжение, замеренное между точкой опорной земли и любой другой точкой в схеме. Например, одна батарейка на рис. 2.10, а имеет напряжение 1,5 В. Мы устанавливаем точку опорной земли на ее отрицательном выводе и присваиваем этой точке значение напряжения 0 В, а точке положительного терминала — значение напряжения 1,5 В.

На схеме рис. 2.10, б две батарейки соединены последовательно, создавая общее напряжение в 3,0 В. Поместив точку опорной земли на отрицательном выводе нижней батарейки, мы получим напряжение 1,5 В в точке соединения двух батареек и 3,0 В на положительном выводе верхней батарейки. Если между точками земли и 3,0 В подключить нагрузку, через нее будет протекать ток, возвращающийся в отрицательный вывод нижней батарейки.

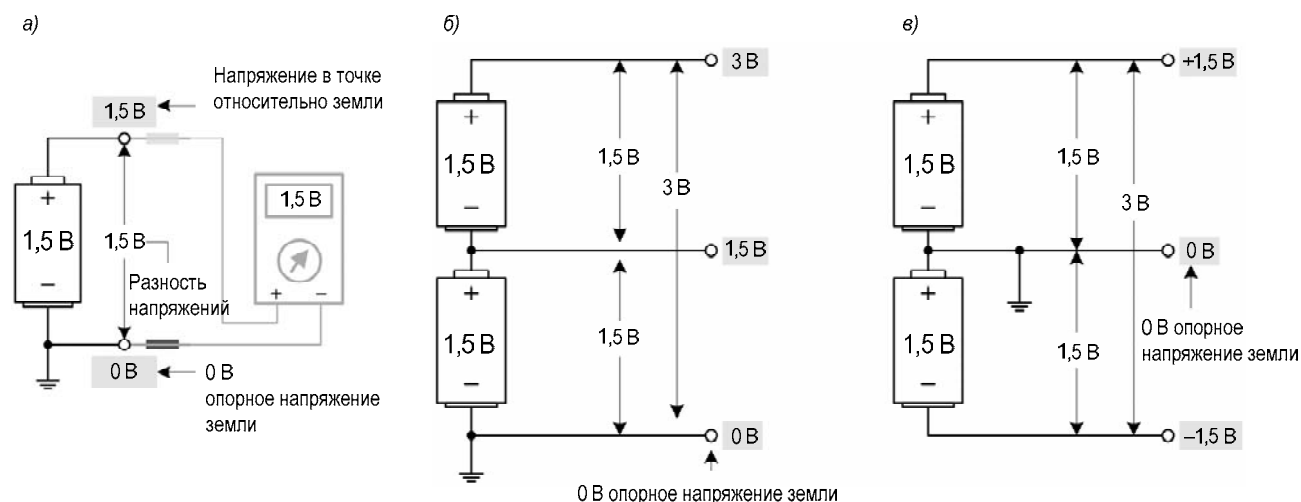


РИС. 2.10. Последовательное соединение батареек

Наконец, можно создать двухполярный источник питания, просто изменив точку опорной земли, разместив ее между батарейками (см. рис. 2.10, в). Таким образом мы получим выводы с напряжением $+1,5$ и $-1,5$ В относительно точки опорной земли напряжением 0 В. В этом случае опорная земля играет роль общего возвратного проводника. Такой тип источника питания, как с положительным, так и с отрицательным напряжением относительно опорной земли с нулевым напряжением, требуется для многих схем. Например, для схем обработки аудио, сигнал которого имеет синусоидальную форму и его напряжение колеблется между положительным и отрицательным значением относительно опорной точки с напряжением 0 В.

2.3.4. Другие источники напряжения

Кроме химических реакций внутри батареи, существуют и другие механизмы создания ЭДС, которая перемещает электроны по цепям проводников. В качестве примера можно назвать, среди прочих, магнитную индукцию, фотогальваническую реакцию, термоэлектрический эффект, пьезоэлектрический эффект и эффект статического электричества. Но из перечисленных механизмов, наряду с химическими реакциями, только магнитная индукция (применяется в электрических генераторах) и фотогальваническая реакция (применяется в фотоэлементах) могут вырабатывать достаточную мощность для питания большинства схем. Мощность, вырабатываемая термоэлектрическим и пьезоэлектрическим эффектами обычно настолько малая (типично в диапазоне милливольт), что их практическое применение ограничено приложениями в области датчиков. Эффект статического электричества основан на придании объектам, таким как проводники и изоляторы, избыточного заряда. Хотя напряжение между заряженными объектами может быть очень высоким, если между ними поместить схему, по ней может протекать очень сильный ток, что чревато повреждением схемы.

Кроме этого, после завершения разряда (что занимает порядка миллисекунд) источник больше не содержит энергии для создания тока в схеме. В электронике статическое электричество считается помехой, а не источником полезной энергии. Все эти механизмы создания ЭДС рассматриваются более подробно далее в книге.

2.3.5. Напряжение как вода

Одним из способов объяснить напряжение будет использование аналогии с водой. На рис. 2.11 источник напряжения постоянного тока можно рассматривать как водяной насос, провода — как трубы, положительные заряды (привет Бенджамину Франклину) — как воду, а условный ток — как течение воды. Нагрузка (резистор) рассматривается как сеть неподвижных частиц, поглощающих энергию, которые ограничивают течение воды. Вы сами можете найти сходства и указать различия.



РИС. 2.11. Объяснение электрического тока аналогией с течением воды

На рис. 2.12 приводится еще одна иллюстрация электрического тока на примере с водой, где вместо насоса давление создается силой тяжести. Хотя эта аналогия во многих отношениях не совсем точная, она, по крайней мере, демонстрирует, как более высокое напряжение (более высокое давление воды) создает более сильный поток зарядов.

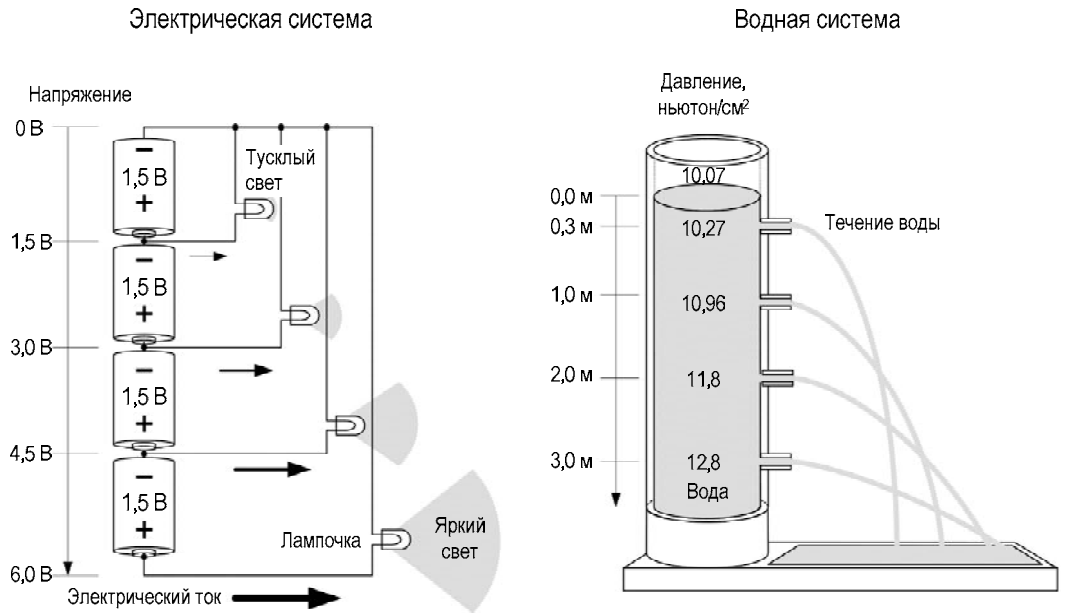


РИС. 2.12. Демонстрация на примере с водой создания более сильного тока более высоким напряжением

Но не стоит уделять слишком много внимания этим водным аналогиям, т. к. они далеко не полностью соответствуют электрическим схемам. Рассматривайте их просто, как грубое приближение. В следующем разделе мы узнаем причины этому.

ПРИМЕР 1

Определить напряжение между указанными точками в схемах на рис. 2.13. Например, напряжение между точками *A* и *B* на рис. 2.13, *a* — 12 В.

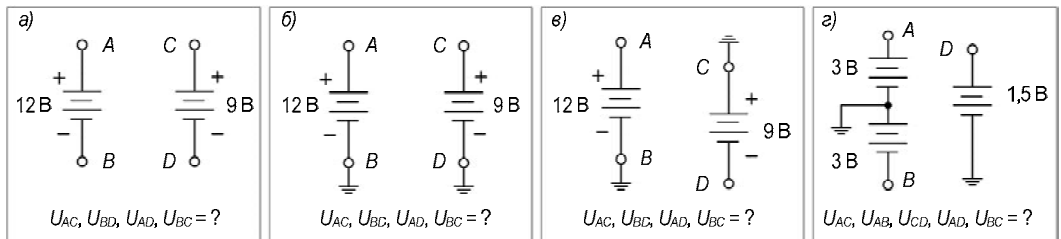


РИС. 2.13. Упражнение в определении напряжений между произвольными точками цепи

Ответ. а) $U_{AC} = 0$ В, $U_{BD} = 0$ В, $U_{AD} = 0$ В, $U_{BC} = 0$ В; б) $U_{AC} = 3$ В, $U_{BD} = 0$ В, $U_{AD} = 12$ В, $U_{BC} = 9$ В; в) $U_{AC} = 12$ В, $U_{BD} = 9$ В, $U_{AD} = 21$ В, $U_{BC} = 0$ В; г) $U_{AC} = 3$ В, $U_{AB} = 6$ В, $U_{CD} = 1,5$ В, $U_{AD} = 1,5$ В, $U_{BD} = 4,5$ В.

ПРИМЕР 2

На рис. 2.14 определить напряжения относительно опорной земли в указанных точках.

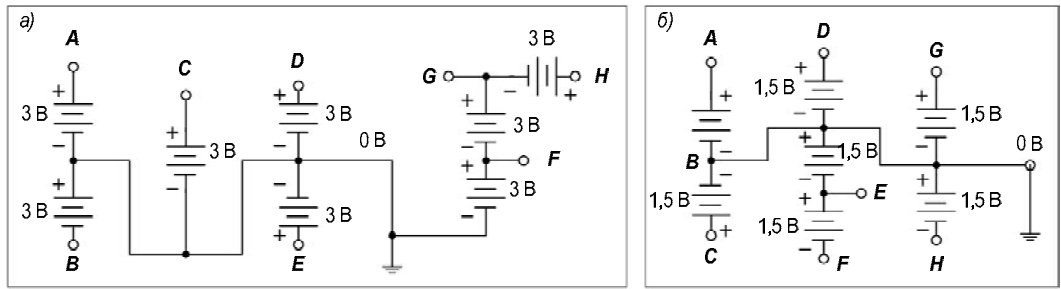


РИС. 2.14. Упражнение в определении напряжения в точке цепи относительно опорной земли

Ответ. а) $U_A = 3 \text{ В}$, $U_B = -3 \text{ В}$, $U_C = 3 \text{ В}$, $U_D = 3 \text{ В}$, $U_E = 3 \text{ В}$, $U_F = 3 \text{ В}$, $U_G = 6 \text{ В}$, $U_H = 9 \text{ В}$; б) $U_A = 1,5 \text{ В}$, $U_B = 0 \text{ В}$, $U_C = 1,5 \text{ В}$, $U_D = 1,5 \text{ В}$, $U_E = -1,5 \text{ В}$, $U_F = -3,0 \text{ В}$, $U_G = 1,5 \text{ В}$, $U_H = -1,5 \text{ В}$.

2.4. Проводимость на микроскопическом уровне (для тех, кого это интересует)

На микроскопическом уровне медный проводник похож на медные шарики, упакованные в так называемую гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК-решетку), как показано на рис. 2.15. Связывающий механизм, удерживающий все вместе в меди, как и в других металлах, называется *металлической связью*. Он заключается в том, что наружные, валентные, электроны атомов металла формируют "электронное облако", которое заполняет пространство между ионами металла. (Ионы — это положительно заряженные атомы, у которых отсутствует один электрон, ставший "свободным". См. планетарную модель на рис. 2.15, б.) Это облако свободных электронов действует как клей, удерживая ионы решетки металла вместе.

Каждый свободный электрон перемещается в облаке свободных электронов с произвольной скоростью и в произвольном направлении, сталкиваясь с ионами металла и другими дефектами (примесями в решетке и стыками границ зерен) и отскакивая от них. Важно осознавать, что все это происходит при комнатной температуре, без приложения какого-либо напряжения.

При комнатной температуре металла свободные электроны никогда не покидают его поверхность. Свободный электрон не может избежать действия силы кулоновского (электрического) притяжения, создаваемой положительными ионами металла в решетке. (Но дальше мы увидим, что при особых условиях электроны могут это сделать посредством своеобразных механизмов.)

Согласно так называемой *модели свободных электронов* (классическая модель, которая рассматривает свободные электроны как газообразное облако невзаимодействующих зарядов) каждый атом меди содержит один свободный электрон, что дает меди концентрацию свободных электронов равной $\rho_n = 8,5 \cdot 10^{28}$ электронов/м³. Согласно предсказанию этой модели при нормальных условиях (т. е. при комнатной температуре и отсутствии любых других воздействий) *тепловая* (или среднеквадратическая) *скорость* v электронов меди составляет около 120 км/с ($1,2 \cdot 10^5$ м/с), но зависит от температуры металла. Перед столкновением с каким-либо другим объектом электрон проходит расстояние (называемое *средним свободным пробегом* λ) около 0,000003 мм ($2,9 \cdot 10^{-9}$ м), а среднее время между столкновениями τ составляет 0,000000000000024 с ($2,4 \cdot 10^{-14}$ с). Модель свободных электронов качественно правильна во многих отношениях, но она не такая точная, как модели на основе квантовой механики. (Взаимосвязь между скоростью, пробегом и временем выражается формулой $v = \lambda/\tau$.)

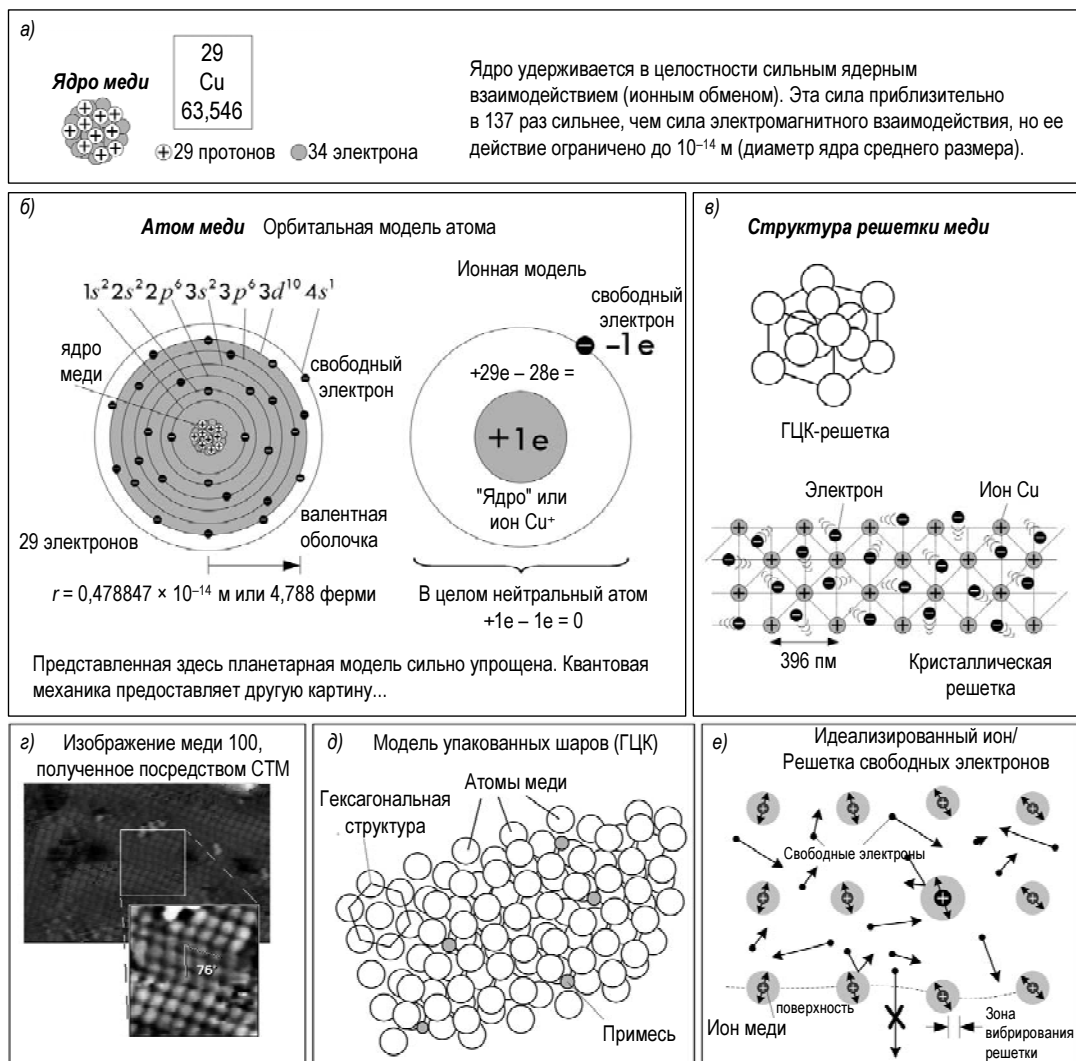


РИС. 2.15. Проводимость: а — ядро меди состоит из протонов и нейтронов, удерживаемых вместе силой ядерного взаимодействия, которая приблизительно в 137 сильнее силы электромагнитного взаимодействия; б — согласно классической планетарной модели ядра меди содержат валентные электроны, которые удерживаются на орбите силой электрического взаимодействия. Для того чтобы объяснить, почему электроны удерживаются на дискретных энергетических уровнях и почему они не падают в ядро или не излучают электромагнитную энергию в процессе вращения на орбите, необходимо применение квантовой механики; в — решетка меди имеет гранецентрированную кубическую структуру; г — изображение меди 100, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Предоставлено Институтом общей физики (Institut für Allgemeine Physik) Технического университета Вены; д — модель решетки упакованных шаров, с нерегулярностью в геометрии решетки, частично вызванной примесями (атомами других элементов); е — представление решетки, показывающей, что атомы решетки вибрируют в результате внешних температурных воздействий и взаимодействия со свободными электронами. Свободные электроны перемещаются произвольно с разными скоростями и в разных направлениях, сталкиваясь с другими электронами и ионами решетки. В обычных условиях они не выходят за пределы поверхности металла

В квантовой механике электроны повинуются законам распределения скоростей, основанным на квантовой физике, и движение электронов зависит от этих понятий в области квантов. Для этого требуется рассматривать электроны, как будто бы они были волнами, разбивающимися о решетчатую структуру меди. Квантовая точка зрения показывает, что тепловая скорость (которая здесь называется скоростью Ферми v_F) свободного электрона будет выше, чем предсказываемая моделью свободных электронов, а именно около $1,57 \cdot 10^6$ м/с, а также практически не зависит от температуры материала. Кроме этого, квантовая модель предсказывает более продолжительный средний свободный пробег, около $3,9 \cdot 10^{-8}$ м, который также не зависит от температуры. Квантовая точка зрения является общепринятой, поскольку

ку предоставляемые ею ответы более точно соответствуют экспериментальным данным. В табл. 2.2 приводится список скоростей Ферми (среди прочих свойств) для электронов нескольких основных металлов.

Таблица 2.2. Свойства некоторых металлов в плотном состоянии

Материал	Энергия Ферми E_F , эВ	Температура Ферми, $\times 10^4$ К	Скорость Ферми $V_F = c \sqrt{\frac{2E_F}{m_e c^2}}, \times 10^6$ м/с	Плотность свободных электронов $\rho_e, \times 10^{28}$ электронов/м ³	Работа выхода W , эВ
Медь (Cu)	7,00	8,16	1,57	8,47	4,7
Серебро (Ag)	5,49	6,38	1,39	5,86	4,73
Золото (Au)	5,53	6,42	1,40	5,90	5,1
Железо (Fe)	11,1	13,0	1,98	17,0	4,5
Олово (Sn)	8,15	9,46	1,69	14,8	4,42
Свинец (Pb)	9,47	11,0	1,83	13,2	4,14
Алюминий (Al)	11,7	13,6	2,03	18,1	4,08

Примечание: 1 эВ = $1,6022 \cdot 10^{-19}$ Дж, $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с.

Данные по энергии Ферми и плотности свободных электронов взяты из книги Ashcroft N.W., Mermin N.D. *Solid State Physics*. — Saunders, 1976 г. (Эшкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела). Данные по работе выхода взяты из книги Paul A. Tipler и Ralph A. Llewellyn. *Modern Physics*. — 3-е изд. — W. Freeman, 1999 (Пол А. Типлер и Ральф А. Ллевеллин. Современная физика).

Кроме этого, *поверхностная энергия связи* (создаваемая электростатическим притяжением), которая не позволяет электронам покидать поверхность металла, называемая *работой выхода*, составляет для меди около 4,7 эВ ($1 \text{ эВ} = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Дж). Электроны могут оставить поверхность только посредством особых процессов, таких как термоэлектронная эмиссия, автоэлектронная эмиссия, вторичная эмиссия или фотоэлектронная эмиссия.

(*Термоэлектронная эмиссия* — преодоление свободными электронами работы выхода материала за счет получения достаточно дополнительной энергии вследствие повышения температуры. Испущенный таким образом электрон называется *термоэлектроном*. *Автоэлектронная эмиссия* — дополнительная энергия электрического поля, создаваемого проводником под высоким напряжением, которая создает положительное поле с притяжением, достаточным, чтобы свободные электроны могли преодолеть границы поверхности материала. Для эмиссии этого типа требуются огромные напряжения — порядка мегавольт (МВ) на сантиметр между эмитирующей поверхностью и положительным проводником. *Вторичная эмиссия* — электроны эмитируются из металлической поверхности под воздействием бомбардировки высокоскоростными электронами или другими частицами. *Фотоэлектронная эмиссия* — эффект, когда электрон в материале поглощает энергию входящего фотона определенной частоты, что придает ему достаточно энергии для преодоления работы выхода. Для этого фотон должен быть "правильной" частоты, определяемой на основе выражения $W = hf_0$ [константа Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с или $4,14 \cdot 10^{-14}$ эВ, f_0 — частота в герцах].)

2.4.1. Приложение напряжения

Далее мы хотим узнать, что будет, если приложить напряжение к противоположным концам проводника, например, подсоединив толстую медную проволоку к выводам батареи. Вследствие такого действия все произвольно перемещающиеся электроны подвергаются воздействию, направленному к положительному концу

провода и вызванному наведенным в проводе электрическим полем. (Данное поле создается в результате накопления отрицательного заряда подаваемых электронов на одном конце относительно нейтрального заряда на другом конце.) Но эта сила оказывает небольшое фактическое воздействие на движение случайных электронов, поскольку тепловая скорость настолько высокая, что изменение движущей силы электронов сопряжено с трудностями. Все, что происходит, — это небольшое параболическое отклонение от траектории (рис. 2.16).

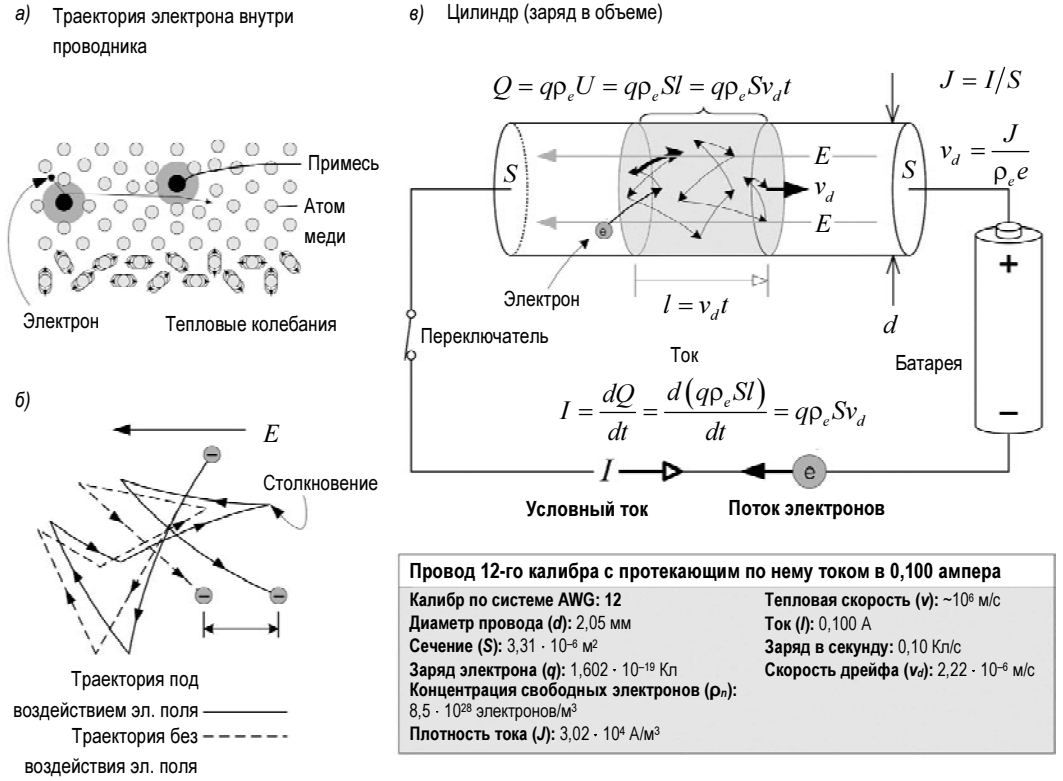


РИС. 2.16. Что происходит внутри провода: а — упрощенное представление произвольного перемещения электрона в кристаллической решетке меди, отскакивая от атомов решетки и примесей; б — электрон часто сталкивается с ионами и примесями в металле и отскакивает от них в случайном направлении. В электрическом поле электрон принимает небольшую составляющую скорости, противоположную направлению поля. Показанная на рисунке разница в траекториях гиперболизирована для наглядности. Траектория электрона в электрическом поле слегка параболическая; в — модель, иллюстрирующая плотность тока, скорость дрейфа, плотность заряда, тепловую скорость и ток

Обычно присутствующее в проводе поле создает компоненту общего ускорения в направлении электрической силы, но постоянные столкновения электрона создают силу торможения, подобную создаваемой парашютом. Конечным результатом является средняя групповая скорость, называемая *скоростью дрейфа* v_d . Эта скорость на удивление низкая. Например, напряжение, достаточное для создания тока в 0,100 А в проводнике 12-го калибра по AWG, вызывает скорость дрейфа, равную всего лишь около 0,002 мм/с! Скорость дрейфа является зависимой величиной, определяемой следующей формулой:

$$v_d = \frac{J}{\rho_e e},$$

где J — плотность тока, т. е. ток, протекающий через сечение ($J = I/S$); ρ_e — плотность свободных электронов в материале; e — заряд электрона. Плотность свободных электронов для основных металлов приводится в табл. 2.2. Как можно видеть, скорость дрейфа меняется в зависимости от тока и диаметра проводника.

Скорость дрейфа настолько низкая, всего лишь доли миллиметров в секунду, что заставляет задуматься, как наблюдаемый ток может вообще протекать. Например, что происходит, когда мы включаем фонарик? Конечно же, мы не ждем часами, пока электроны доберутся от батарейки до нити накаливания лампочки. В действительности происходит следующее: когда мы замыкаем цепь, щелкнув выключателем, электрическое поле входящего в провод электрона оказывает отталкивающее влияние на своего соседа в проводнике. Этот сосед тогда "убегает" от этого электрона по направлению к следующему соседу, вызывая такую же реакцию у него и создавая цепь взаимодействий, которая распространяется по материалу почти со скоростью света. (Эта ситуация иллюстрируется на рис. 2.17.)

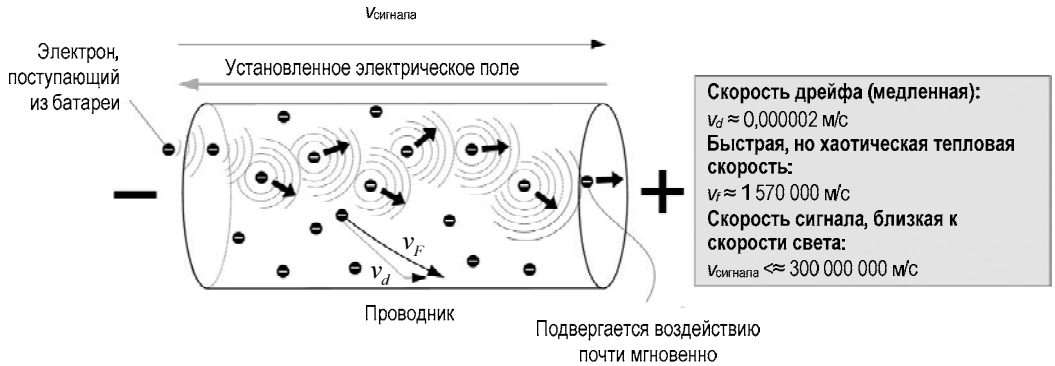


РИС. 2.17. Иллюстрация распространения электрического поля вдоль проводника под воздействием подаваемых в него из батареи электронов

Скорость этой реакции, хоть и приближается к скорости света, не совсем равна ей. Она чуть ниже, а насколько ниже — зависит от материала. В ответ на приложенное напряжение все свободные электроны в проводнике начинают двигаться одновременно, как и ближайшие к выключателю, так и ближайшие к нити накаливания. Возвращаясь к аналогии с водой, подобный эффект возникает, когда мы включаем воду в поливном шланге. Так как шланг уже заполнен водой, вода начинает литься из него почти сразу же. Напор воды на конце крана быстро передается вдоль шланга и вода начинает литься из другого конца почти в момент открытия крана.

В случае переменного тока электрическое поле меняет направление синусоидально, заставляя компонент скорости дрейфа электронов колебаться вперед и назад. Если частота переменного тока 60 Гц, компонент скорости дрейфа будет колебаться вперед и назад 60 раз в секунду. При максимальной скорости дрейфа цикла переменного тока равной 0,002 мм/с, расстояние между пиками колебаний дрейфа будет около 0,00045 мм. Конечно же, это совсем не означает, что электроны постоянно двигаются колебательным образом. Это значит лишь то, что существует компонент смещения дрейфа электронов, если можно так выразиться. Вспомните, что в целом перемещение электрона довольно хаотическое, а его фактическое смещение большое вследствие тепловых эффектов.

2.5. Сопротивление, удельное сопротивление и проводимость



Как было изложено в предыдущем разделе, при комнатной температуре свободные электроны в медном проводнике часто сталкиваются с другими электронами, ионами кристаллической решетки меди и примесями в решетке, что ограничивает их поступательное движение. Эти механизмы микроскопического масштаба, противодействующие потоку электронов, называются *электрическим сопротивлением* или просто сопротивлением. В 1826 г. немецкий физик Георг Симон Ом (Georg Simon Ohm) опубликовал результаты своих экспериментов касательно сопротивления

разных материалов, которые он проводил, используя качественный подход, который не принимал во внимание скрытые механизмы, а только конечные наблюдаемые результаты. Он открыл линейную зависимость между силой тока, протекающего по материалу, и напряжением, прилагаемым для создания этого тока. Он определил сопротивление, как соотношение прилагаемого напряжения к вызываемому им току:

$$R \equiv \frac{U}{I}. \quad (2.4)$$

Это утверждение называется *законом Ома*; в нем R означает сопротивление, выражаемое в вольтах на ампер или омах (для обозначения омов используется греческая буква омега — Ω). Один ом представляет собой сопротивление, через которое протекает ток силой в 1 ампер, когда к нему прилагается напряжение в 1 вольт:

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/1 А}.$$

Для обозначения резисторов на отечественных принципиальных схемах используется символ , а на зарубежных — символ .

По сути, закон Ома в действительности не является таковым, а эмпирическим утверждением о поведении материалов. В действительности, существуют некоторые материалы, с которыми закон Ома не работает. На рис. 2.18 приводится иллюстрация закона Ома и его применения с разными материалами.

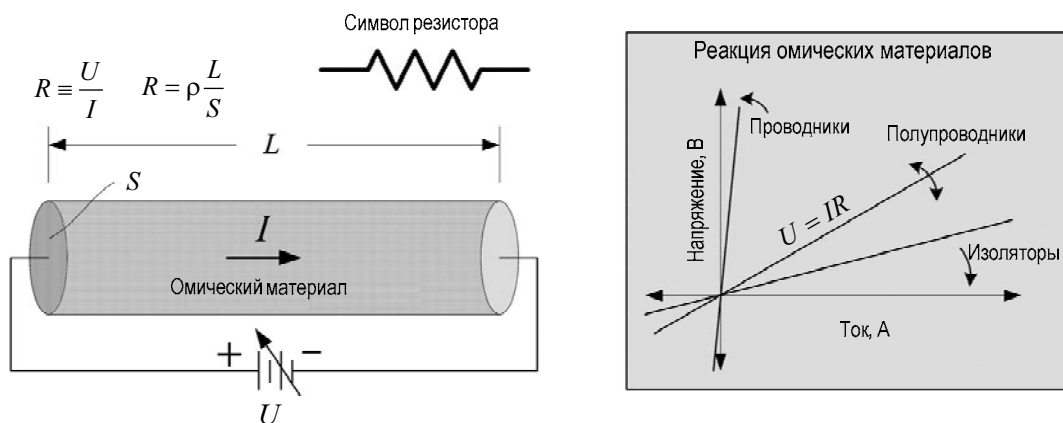


РИС. 2.18. Закон Ома и его применение с разными материалами

Закон Ома применим только к омическим материалам, т. е. материалам с постоянным сопротивлением в диапазоне напряжений. С другой стороны, неомические материалы не следуют этому шаблону и закон Ома к ним неприменим. Например, такое устройство, как диод, пропускает ток беспрепятственно при положительном направлении, но блокирует его, создавая высокое сопротивление, при отрицательном напряжении.

Интересная заметка о законе Ома

Обычно закон Ома пишется таким образом:

$$U = IR.$$

Но в этом случае может возникнуть соблазн определять напряжение в терминах сопротивления и тока. Важно осознавать, что в законе Ома символ R обозначает сопротивление омического материала и не зависит от U (напряжения). Фактически, закон Ома ничего не говорит о напряжении, а определяет сопротивление на его основе, поэтому его нельзя применять в других областях физики, таких, как стати-

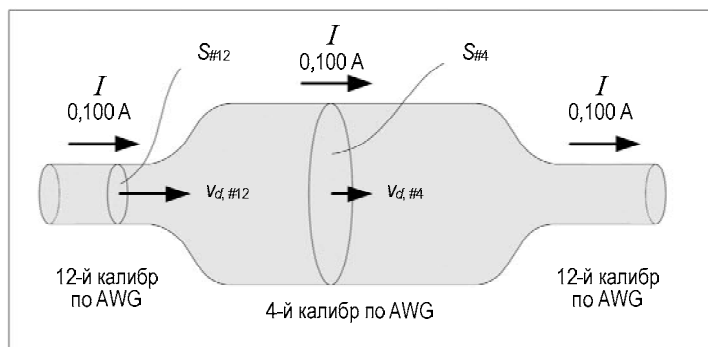
ческое электричество, поскольку в данном случае отсутствует ток. Иными словами, мы не определяем напряжение в терминах тока и сопротивления, а определяем сопротивление в терминах напряжения и тока. Но это не означает, что закон Ома нельзя использовать, например, чтобы, зная ток, вычислить напряжение на известном сопротивлении. Более того, такие вычисления выполняются постоянно при анализе схем.

2.5.1. Зависимость сопротивления от формы проводника

Сопротивление провода из определенного материала зависит от его формы. Удвоение длины проводника удваивает его сопротивление, уменьшая ток наполовину при таком же напряжении. И наоборот, удваивание диаметра провода имеет противоположный эффект — сопротивление уменьшается в половину, а ток увеличивается вдвое при таком же напряжении.

Повышение сопротивления с увеличением длины провода можно объяснить тем, что это добавляет дополнительные ионы и примеси в кристаллическую решетку, сопротивление которых должно преодолеть прилагаемое поле (т. е. электрическое поле, создаваемое электронами, добавляемыми в проводник источником питания). Это поле должно выполнять больший объем работы по перемещению электронов, т. к. по мере продвижения вдоль проводника количество сопротивляющихся ему электронов возрастает, поскольку возрастает среднее число столкновений.

Уменьшение сопротивления при увеличении диаметра проводника можно объяснить тем, что проводник большего объема (который следует из большего диаметра) может поддерживать больший объем тока. Если пропустить ток силой в 0,100 А по тонкому и толстому проводу, в тонком проводе этот ток должен проходить по меньшему объему проводника, тогда как в толстом проводнике он распределяется по большему объему. Ограниченные меньшим объемом электроны сталкиваются с другими электронами, ионами кристаллической решетки и примесями чаще, чем электроны в большем объеме. Согласно утверждениям Бенджамина Франклина, поток концентрации свободных электронов представляет условный ток концентрации зарядов в обратном направлении. Эта концентрация тока называется *плотностью тока* J и означает уровень тока, проходящего через единицу сечения. Для провода плотность тока определяется формулой $J = I/S$, где S означает площадь сечения провода. На рис. 2.19 демонстрируется, что плотность тока в тонком проводе 12-го калибра больше, чем в более толстом проводе 4-го калибра. Здесь же иллюстрируется более низкая скорость дрейфа в толстом проводе по сравнению с тонким вследствие пониженного давления электронного поля в направлении потока электронов.



Ток силой 0,100 А		
Калибр по AWG	12	4
Диаметр провода (d):	2,05 мм	5,19 мм
Площадь сечения (S):	$3,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	$2,11 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$
Скорость дрейфа (v_d):	$2,22 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$	$3,48 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$
Плотность тока (J):	$30,211 \text{ А/м}^2$	$4,739 \text{ А/м}^2$

Проводимость (σ): $1,7 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$
 Удельное сопротивление (ρ): $6,9 \cdot 10^8 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$
 Свойства меди, не зависящие от размера проводника

РИС. 2.19. Зависимость сопротивления провода от его диаметра. Сопротивление более тонкого провода на единицу длины выше, чем толстого

2.5.2. Удельное сопротивление и проводимость

Мы еще не рассмотрели самый важный аспект сопротивления, который не имеет ничего общего с физическими размерами проводника. А именно, как влияет на сопротивление материала его химический состав? Например, если взять два провода одинакового размера, но один медный, а другой латунный, какой из них будет иметь большее сопротивление? Чтобы ответить на этот вопрос, а также чтобы предоставить способ категоризации материалов, мы обратимся к понятию *удельного сопротивления*. В отличие от сопротивления, удельное сопротивление полностью не зависит от размеров проводника, а является уникальным свойством материала. *Удельное сопротивление* ρ определяется таким образом:

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (2.5)$$

где S — площадь поперечного сечения; l — длина проводника; R — общее сопротивление проводящего материала, измеренное по его длине. Удельное сопротивление измеряется в ом-метрах (Ом · м).

Для некоторых удельное сопротивление кажется слишком отрицательным понятием — оно говорит нам, насколько *плохо* что-то проводит ток. Оптимисты предпочитают ему понятие проводимости — насколько *хорошо* что-то проводит ток. *Проводимость* (или *электропроводность*) G — просто инверсия сопротивления:

$$G = \frac{1}{R}. \quad (2.6)$$

Единица измерения проводимости — сименс, См = Ом⁻¹.

А *удельная проводимость* (или *удельная электропроводность*) — величина, обратная удельному сопротивлению:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Единица измерения удельной проводимости — сименс на метр, См/м:

$$\frac{\text{См}}{\text{м}} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}.$$

Примечание

С математической точки зрения (Ом · м)⁻¹ = 1/(Ом · м).

Как удельная проводимость, так и удельное сопротивление содержат одинаковую важную информацию. Некоторые предпочитают работать с уравнениями, содержащими оптимистическое понятие удельной проводимости (стакан наполовину полный), а другим больше нравится пессимистичный вариант удельного сопротивления (стакан наполовину пустой).

В терминах удельного сопротивления и удельной проводимости закон Ома можно переписать следующим образом:

$$U = IR = \rho \frac{l}{S} I = \frac{l}{\sigma S}. \quad (2.7)$$

В табл. 2.3 приводятся значения удельной проводимости и удельного сопротивления для разных материалов. (Более подробный список можно найти в каком-либо техническом справочнике, таком как, например, "*Справочник по химии и физике*".)

Удельная проводимость металлов, таких как медь или серебро, в 10²¹ раз выше, чем хорошего изолятора, например, тефлона. Хотя проводимость серебра немного лучше, чем меди, оно слишком дорогое для повседневного практического приме-

Таблица 2.3. Удельная проводимость и удельное сопротивление разных материалов

Материал	Удельное сопротивление ρ , Ом·м	Удельная проводимость σ , (Ом·м) ⁻¹	Температурный коэффициент α , °С ⁻¹	Термическое удельное сопротивление, (Вт/(см·°С)) ⁻¹	Теплопроводность λ Вт/(м·К)
Проводники					
Алюминий	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$3,55 \cdot 10^7$	0,0039	0,462	209
Золото	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$4,10 \cdot 10^7$		0,343	308
Серебро	$1,59 \cdot 10^{-8}$	$6,29 \cdot 10^7$	0,0038	0,240	407
Медь	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$5,81 \cdot 10^7$	0,0039	0,254	384
Железо	$10,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^7$	0,0050	1,495	92
Вольфрам	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^7$	0,0045	0,508	173
Платина	$10,6 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^7$	0,003927		70
Свинец	$0,22 \cdot 10^{-6}$	$4,54 \cdot 10^6$		2,915	35,3
Сталь (нержавеющая)	$0,72 \cdot 10^{-6}$	$1,39 \cdot 10^6$		6,757	47
Нихром	$100 \cdot 10^{-8}$	$0,1 \cdot 10^7$	0,0004		12–23
Манганин	$44 \cdot 10^{-8}$	$0,23 \cdot 10^7$	0,00001		22–36
Латунь	$7 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^7$	0,002	0,820	97–111
Полупроводники					
Углерод (графит)	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^4$	–0,0005		278,4–2435
Германий	0,46	2,2	–0,048		60,2
Кремний	640	$3,5 \cdot 10^{-3}$	–0,075	0,686	150 (чистый)
Арсенид галлия				1,692	150
Изоляторы					
Стекло	10^{10} – 10^{14}	10^{-14} – 10^{-10}			~0,7
Неопреновая резина	10^9	10^{-9}			
Кварц (плавленый)	$75 \cdot 10^{16}$	10^{-16}			8
Сера	10^{15}	10^{-15}			0,27
Тефлон	10^{14}	10^{-14}			0,25

нения. Проводимость алюминия слегка хуже, но все равно довольно хорошая. В одно время алюминиевые провода интенсивно использовались для домашней проводки, но было обнаружено, что они сильно окисляются, препятствуя созданию хорошего электрического контакта и ограничивая протекание тока каналами малого размера. Это было чревато опасностью пожара.

Важной особенностью удельного сопротивления (или удельной проводимости) является его *температурная зависимость*. Обычно, в определенном температурном диапазоне удельное сопротивление большого числа металлов выражается следующим уравнением:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (2.8)$$

где ρ — удельное сопротивление, рассчитанное на основе установленного опорного удельного сопротивления ρ_0 и температуры T_0 . Символ α обозначает *темпе-*

ратурный коэффициент сопротивления³, измеряемый в единицах 1/°C или (°C)⁻¹ либо в К⁻¹. Удельное сопротивление большинства металлов возрастает с повышением температуры, т. к. вибрации атомов кристаллической решетки, вызываемые тепловой энергией (повышающейся температурой), препятствуют скорости дрейфа проводящих электронов.

Вода, воздух и вакуум — это изоляторы или проводники?

Эти материалы требуют особого внимания (см. соответствующие комментарии по ним в табл. 2.4).

Таблица 2.4. Удельное сопротивление особых материалов

Материал	Удельное сопротивление ρ, Ом · м	Комментарий
Дистиллированная вода	2,5 · 10 ⁵	Дистиллированная вода — очень хороший изолятор, у нее высокое удельное сопротивление. Ее механизм очень слабой проводимости основан на потоке ионов, а не электронов, как у металлов. Обычно вода самоионизируется при комнатной температуре, производя некоторое количество ионов Н ₃ О ⁺ и ОН ⁻ ; но по сравнению с количеством молекул Н ₂ О (1:10 ⁻⁷) это совсем небольшое число. Если к опущенным в емкость с дистиллированной водой на расстоянии друг от друга медным электродам подключить батарею с известным напряжением и замерить ток в проводной части полученной цепи, используя закон Ома, мы увидим, что удельное сопротивление воды составляет около 20 · 10 ⁶ Ом · см. Ионы Н ₃ О ⁺ перемещаются по направлению к отрицательному электроду, а ОН ⁻ — к положительному. Когда любой из этих ионов входит в контакт с электродом, он оставляет на нем или принимает от него электрон, вследствие чего ион возвращается в раствор
Соленая вода	~0,2	Добавление в воду ионного состава в виде обычной поваренной соли (NaCl) повышает концентрацию ионов в растворе вследствие ионизации NaCl в Na ⁺ и Cl ⁻ . Один грамм соли добавляет в раствор около 2 · 10 ²² ионов. Эти ионы играют роль носителей заряда, что практически понижает удельное сопротивление раствора до менее чем одного ом-метра. Если такой раствор использовать в качестве проводника в цепи с батареей и лампочкой, опустив в него электроды, по нему будет протекать ток достаточной силы, чтобы зажечь лампочку
Человеческая кожа	~5,0 · 10 ⁵	Удельное сопротивление варьируется в зависимости от влажности и содержания соли
Воздух		Считается изолятором вследствие довольно малого числа свободных электронов в нем. Но подобно жидкостям воздух часто содержит концентрации положительных и отрицательных ионов. Ионы в воздухе формируются, когда нейтральная молекула воздуха, как кислород (O ₂) или азот (N ₂), теряет электрон вследствие бомбардировки рентгеновскими лучами, гамма-лучами или альфа-частицами, испускаемыми распадающимися атомами радона. (На уровне моря в воздухе создается от 5 до 10 ионных пар на сантиметр в секунду, больше в областях с повышенным содержанием радона.) Положительная молекула кислорода или азота быстро притягивает полярные молекулы (от 10 до 15), в основном воды. Получившийся вследствие этого кластер называется <i>положительным аэроионом</i> . С другой стороны, освобожденный электрон в большинстве случаев присоединяется к молекуле кислорода (азот не испытывает симпатий к электронам). Примечание. Воздух считается электрически нейтральным — ионы всегда создаются в парах, одинаковое количество положительных и отрицательных. Чтобы ток мог протекать по воздуху, к нему нужно приложить электрическое поле, например, установив две пластины параллельно друг другу и подключив их к разным полюсам источника напряжения. Низкое напряжение создает слабое электрическое поле; аэроионы, может быть, и будут перемещаться между пластинами, но поскольку их концентрация такая низкая, ток между пластинами протекать практически не будет.

³ Температурный коэффициент электрического сопротивления — величина, равная отношению изменению электрического сопротивления участка электрической цепи или удельного сопротивления вещества при изменении температуры на единицу. — *Прим. пер.*

Таблица 2.4 (окончание)

Материал	Удельное сопротивление ρ , Ом · м	Комментарий
		<p>Но если повысить силу электрического поля, свободные электроны в воздухе (которые были освобождены посредством природных процессов) можно разогнать до такой высокой скорости (по направлению к положительной пластине), что эти электроны сами будут иметь достаточно энергии, чтобы сталкиваться с молекулами воздуха и создавать дополнительные ионные пары (положительных и отрицательных ионов). Пробивная напряженность поля, при которой начинается такая ионизация, составляет около 3 мегавольт на метр между пластинчатыми электродами. В частности, чтобы между двумя металлическими пластинами, расположенными на расстоянии 1 см друг от друга, возникла ионизация, к ним необходимо приложить напряжение величиной в 30 000 В. Но силу электрического поля можно повысить, заменив одну из пластин заостренным электродом или тонким проводом. Это позволит понизить необходимое для пробоя напряжение на несколько киловольт. Полученный таким образом пробой будет одного из следующего типов.</p> <p><i>Коронный разряд.</i> Ионизация ограничена небольшой областью вокруг электрода, где пробивная напряженность поля превысила пороговое значение. В остальной части поля просто происходит перемещение медленных ионов и даже еще более медленных заряженных частиц к электроду с противоположным зарядом (которым может быть либо пластина, либо просто стена или пол комнаты). Такой разряд может поддерживаться в течение такого времени, пока пробивная напряженность поля превышает пороговое значение в какой-либо области между электродами.</p> <p><i>Искровой разряд.</i> Может происходить между двумя электродами шарообразной формы с разностью потенциалов, один из которых часто заземлен. Подобно коронному разряду искровой разряд происходит в точке, в которой пробивная напряженность поля превышает пороговое значение. Но в отличие от коронного разряда, ионизация заполняет все пространство между электродами. Разряд происходит очень быстро, практически мгновенно, а его энергия замкнута в ограниченном пространстве. Необходимое для пробоя напряжение называется соответственно <i>напряжением пробоя</i>. Например, когда человек заряжается статическим электричеством при ходьбе по изолированному (скажем, ковровому) полу, а затем прикасается к заземленному объекту, между ним и объектом протекает ток, создавая разряд. Разряд происходит даже перед тем, как происходит физический контакт, создавая искру. При напряжениях ниже 1000 В такие разряды замечают очень немногие люди. При напряжении около 2000 В большинство людей ощущают неприятный эффект. И почти все испытывают значительный дискомфорт при напряжениях разряда выше 3000 В.</p> <p><i>Кистевой разряд.</i> Что-то среднее между коронным и искровым разрядами, который происходит, например, между заряженным материалом и заземленным электродом с кривизной радиусом в несколько миллиметров. Если кистевой разряд удерживается длительное время, он может принимать форму неравномерных светящихся траекторий. Почти все разряды с изоляторов являются кистевыми. Это такие разряды, которые возникают, например, когда вы берете только что "испеченную" фотокопию, и проявляются в виде потрескиваний, которые чувствуются при натягивании свитера через голову</p>
Вакуум		<p>Считается идеальным изолятором, поскольку по определению он полностью лишен свободных зарядов. Но это не означает, что через вакуум не могут происходить разряды. Электроны могут инжектироваться из материала в так называемый вакуум посредством различных механизмов. (Это также относится и к воздуху.) Далее приводятся несколько примеров таких механизмов.</p> <p><i>Термоэлектронная эмиссия.</i> Свободные электроны преодолевают барьер поверхностного потенциала (работу выхода) материала за счет получения достаточного объема дополнительной энергии вследствие повышения температуры.</p> <p><i>Автоэлектронная эмиссия.</i> Дополнительная энергия электрического поля, создаваемого проводником под высоким напряжением, создает положительное поле с притяжением, достаточным, чтобы свободные электроны могли преодолеть границы поверхности материала. Требуется громадных напряжений (порядка мегавольт на сантиметр между эмитирующей поверхностью и положительным электродом).</p> <p><i>Вторичная эмиссия.</i> Электроны эмитируются из металлической поверхности под воздействием бомбардировки высокоскоростными электронами или другими частицами.</p> <p><i>Фотоэлектронная эмиссия.</i> Эффект, когда электроны выбиваются из поверхности материала под воздействием бомбардировки фотонами определенной частоты (поглощенными фотонами).</p> <p>Многие из этих механизмов применяются в технологии изготовления электронных ламп. Но при отсутствии таких механизмов для предоставления электронов в вакууме нет источника зарядов, чтобы поддерживать ток</p>

2.6. Изоляторы, проводники и полупроводники

Как мы уже видели, удельное электрическое сопротивление проводников сильно отличается от изоляторов. Удельное сопротивление хорошего проводника составляет около 10^{-8} Ом·м, а хорошего изолятора — около 10^{14} Ом·м; для типичного полупроводника оно от 10^{-5} до 10^3 Ом·м, в зависимости от температуры. Как эту разницу в удельном сопротивлении можно объяснить на микроскопическом уровне?

Ответ на этот вопрос основывается на квантовой природе электронов. Согласно принципам классической физики энергия электрона может быть любого значения; утверждается, что значения энергии электрона составляют континуум. (Иными словами, считается, что на бесконечном расстоянии от ядра энергия электрона равна нулю и становится все более отрицательной относительно нулевой точки по мере его приближения к ядру. Под отрицательной энергией подразумевается, что между положительно заряженным ядром и электроном существует электрическое притяжение — это электрическая потенциальная энергия.) Но квантовое описание электронов в металле показывает, что значения энергии электронов квантуются, принимая дискретные значения. Это объясняется волновой природой электронов — аналогично стоячим волнам на струнах, существующим только на дискретных частотах. На рис. 2.20 приведена энергетическая диаграмма, иллюстрирующая возможные энергетические уровни электрона (без учета влияния кристаллической решетки). Диаграмма иллюстрирует только возможные энергетические уровни, электроны не обязательно находятся на каждом уровне.

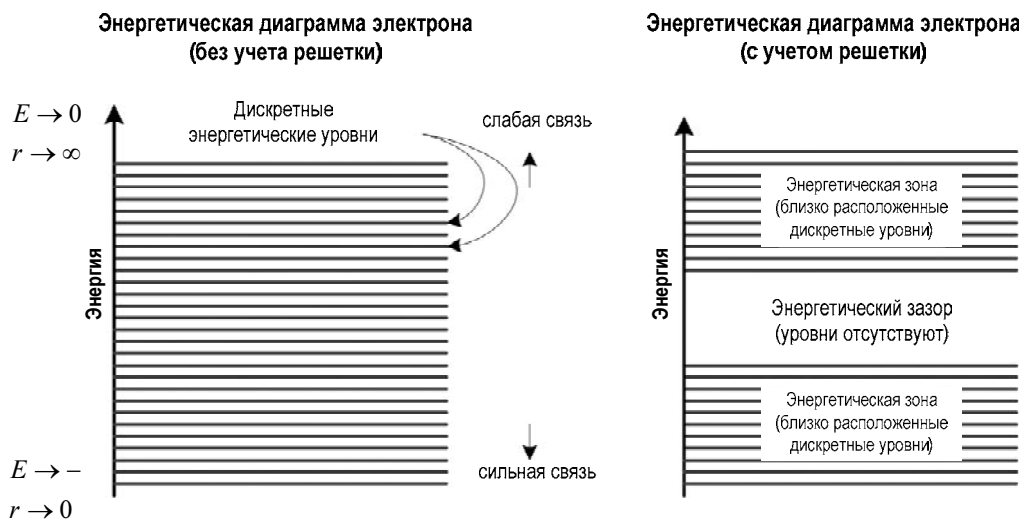


РИС. 2.20. Слева: энергетическая диаграмма, показывающая все возможные энергетические уровни электрона в твердом веществе; влияние атомной кристаллической решетки не принимается во внимание. Справа: энергетическая диаграмма, показывающая возможные энергетические уровни электрона в материале с обычной атомной решеткой. Значения энергии электронов ограничены определенными зонами с большим энергетическим зазором, недоступным для электронов. Даже в энергетических зонах возможные значения энергии электронов находятся на близко расположенных дискретных уровнях

Когда набор атомов создает обычную фоновую решетку, возможные энергетические значения электронов изменяются еще больше. Дискретные энергетические зоны⁴ остаются, но между ними теперь находятся так называемые энергетические зазоры⁵. Энергетические зазоры недоступны для электронов; распространяющаяся

⁴ Энергетические зоны также называются разрешенными (для электронов) зонами. — Прим. пер.

⁵ Энергетические зазоры также называются запрещенными (для электронов) зонами. — Прим. пер.

волна (т. е. электрон) при помещении в периодический электрический потенциал положительных ионов кристаллической решетки металла не может существовать в этих зонах. В масштабах атомной физики эти зазоры довольно большие — в диапазоне электрон-вольт. Опять же, показанные на диаграмме энергетические уровни представляют только возможные значения энергии электрона; электрон может занимать или не занимать их.

В квантовой механике существует интересное свойство, называемое *принципом запрета Паули*, которое играет критическую роль в определении свойств материалов. Согласно этому принципу, два и более электрона атома не могут одновременно находиться в одинаковом квантовом состоянии. Наименьшим общим делителем квантовых состояний является *спиновое квантовое число* m_s , согласно которому два электрона с противоположными спинами (верхним или нижним) не могут находиться на одном и том же энергетическом уровне. Если рассматривать твердое вещество, которое имеет большое количество свободных электронов, находящихся в состоянии равновесия, электроны заполняют самые низкие энергетические уровни, доступные в энергетической зоне, до двух на каждом уровне. Связь между электронами, которые находятся на более низких энергетических уровнях, более сильная; эти электроны называются *внутренними электронами*. Когда все электроны находятся на самом нижнем энергетическом уровне, возможны два результата. В первом случае высший уровень, который нужно заполнить, находится где-то посередине энергетической зоны. Во втором случае электроны просто полностью заполняют одну или несколько зон. Предполагается, что температура материала достаточно низкая, чтобы электроны не переходили на более высокие энергетические уровни под влиянием температуры.

Если теперь придать свободным электронам дополнительную энергию, например, приложив электрическое поле (подключив источник напряжения), электроны на нижних энергетических уровнях не смогут поглотить эту энергию, поскольку они не могут переместиться на более высокий энергетический уровень, т. к. он уже занят. Поглотить энергию смогут только электроны, находящиеся на высших уровнях, и то только в том случае, если поблизости есть свободные уровни, на которые они могут переместиться. Материалы, энергетические зоны которых заполнены электронами лишь частично, являются *проводниками*. Когда высший слой их электронов свободно перемещается на пустой энергетический уровень, расположенный непосредственно выше, протекает ток. Электроны, которые перескакивают с более низкого уровня на более высокий, называются *возбужденными электронами*. Заполненная электронами энергетическая зона называется *валентной зоной*. А не содержащая электронов энергетическая зона называется *зоной проводимости*. На рис. 2.21, а и в показана структура энергетических зон для проводников.

Если энергетическая зона материала полностью заполнена электронами с максимальной энергией, тогда слабое электрическое поле не придаст этим электронам достаточно энергии, чтобы они смогли перескочить через энергетический зазор на нижний уровень следующей (пустой) энергетической зоны. В этом случае мы имеем дело с *изолятором* (рис. 2.21, б). Примером хорошего изолятора будет алмаз, с энергетическим зазором в 6 эВ.

В полупроводниках электроны с максимальной энергией заполняют валентную зону при $T = 0$, как и в изоляторах. Но в отличие от изоляторов, у полупроводников небольшой энергетический зазор между этой зоной и следующей, зоной проводимости. Вследствие этого приложение умеренного электрического поля (или повышение температуры) позволит электронам перескочить через зазор, тем самым проводя электричество. Таким образом, существует минимальное электрическое поле, под воздействием которого материал превращается из изолятора в проводник. Энергетические зазоры кремния и германия составляют 1,1 и 0,7 эВ, соответственно, и эти материалы являются полупроводниками. Для полупроводников повыше-