

Юрий Ревич

# занимательная ЭЛЕКТРОНИКА

3-е издание

Санкт-Петербург  
«БХВ-Петербург»  
2015

УДК 621.3  
ББК 32  
Р32

**Ревич Ю. В.**

Р32 Занимательная электроника. — 3-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2015. — 576 с.: ил.

ISBN 978-5-9775-3479-6

На практических примерах рассказано о том, как проектировать, отлаживать и изготавливать электронные устройства в домашних условиях. От физических основ электроники, описания устройства и принципов работы различных радиоэлектронных компонентов, советов по оборудованию домашней лаборатории автор переходит к конкретным аналоговым и цифровым схемам, включая устройства на основе микроконтроллеров. Приведены элементарные сведения по метрологии и теоретическим основам электроники. Дано множество практических рекомендаций: от принципов правильной организации электропитания до получения информации о приборах и приобретении компонентов применительно к российским условиям. Третье издание дополнено сведениями о популярной платформе Arduino, с которой любому радиолюбителю становятся доступными самые современные радиоэлектронные средства.

*Для широкого круга радиолюбителей*

УДК 621.3  
ББК 32

**Группа подготовки издания:**

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Евгений Рыбаков</i>
Зав. редакцией	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Редактор	<i>Григорий Добин</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Марины Дамбиевой</i>

Подписано в печать 28.11.14.

Формат 70×100<sup>1/16</sup>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 46,44.

Тираж 1500 экз. Заказ №

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

Первая Академическая типография "Наука"  
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12/28

ISBN 978-5-9775-3479-6

© Ревич Ю. В., 2015  
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2015

# Оглавление

<b>К читателю .....</b>	<b>11</b>
Радиолюбительство — что это такое? .....	12
Как пользоваться книгой? .....	15
Как разрабатывать электронные схемы? .....	16
<b>ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ ОСНОВ.....</b>	<b>19</b>
<b>ГЛАВА 1. ЧЕМ ОТЛИЧАЕТСЯ ТОК ОТ НАПРЯЖЕНИЯ? .....</b>	<b>21</b>
Связь тока и напряжения.....	22
Регулирование тока с помощью сопротивления.....	25
Источники напряжения и тока.....	28
<b>ГЛАВА 2. ДЖЕНТЛЬМЕНСКИЙ НАБОР</b>	
<b>Оборудуем домашнюю лабораторию .....</b>	<b>31</b>
Мультиметр .....	32
Источник питания.....	36
Осциллограф .....	37
<b>ГЛАВА 3. ХОРОШИЙ ПАЯЛЬНИК — ПОЛОВИНА УСПЕХА</b>	
<b>Инструменты и технологические советы.....</b>	<b>43</b>
Инструменты и материалы .....	44
Паяльники.....	46
Флюсы для пайки.....	48
Макетные платы.....	49
Платы.....	53
Монтаж .....	55
Немного о проводах .....	57
Корпуса.....	58
Новые подходы в любительском конструировании .....	60
<b>ГЛАВА 4. ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА</b>	
<b>О частотах, периодах, мощности, переменных напряжениях и токах</b>	
<b>и немного о сигналах .....</b>	<b>63</b>
Мощность.....	67
Что показывал вольтметр?.....	68

Сигналы .....	72
О переменном токе и электропитании .....	72
Децибелы .....	73

## **ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРОНИКА БЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

<b>Резисторы, конденсаторы и схемы на их основе.....</b>	<b>75</b>
Резисторы .....	75
Переменные резисторы .....	79
Параллельное и последовательное соединение резисторов.....	80
Конденсаторы .....	82
Параллельное и последовательное включение конденсаторов.....	89
Конденсаторы в цепи переменного тока.....	90
Дифференцирующие и интегрирующие цепи .....	91
Индуктивности.....	93

## **ГЛАВА 6. ИЗОБРЕТЕНИЕ, КОТОРОЕ ПОТЯСАЛО МИР**

<b>Диоды, транзисторы и простейшие схемы на их основе .....</b>	<b>95</b>
Диоды .....	95
Транзисторы.....	97
Ключевой режим работы биполярного транзистора .....	100
Усилительный режим работы биполярного транзистора.....	103
Включение транзистора с общим коллектором .....	105
Стабильный усилительный каскад на транзисторе.....	106
Дифференциальный каскад.....	108
Полевые транзисторы.....	110
Выбор транзисторов .....	112

## **ГЛАВА 7. ОШЕЛОМЛЯЮЩЕЕ РАЗНООБРАЗИЕ ЭЛЕКТРОННОГО МИРА**

<b>Реле, стабилитроны, светодиоды... ..</b>	<b>117</b>
Электромагнитные реле .....	117
Стабилитроны .....	122
Оптоэлектроника и светодиоды .....	124
Оптоэлектроника .....	125
Светодиоды .....	127
Светодиодные индикаторы .....	129
ЖК-дисплеи.....	130
Простейший уровнемер для водяных баков.....	133

## **ЧАСТЬ II. АНАЛОГОВЫЕ СХЕМЫ..... 137**

### **ГЛАВА 8. ЗВУКОВОЙ УСИЛИТЕЛЬ БЕЗ МИКРОСХЕМ**

<b>Классическая схема УМЗЧ .....</b>	<b>139</b>
Схема базового УМЗЧ.....	140
Мощность усилителя.....	143
Стабильность.....	144
О мощности выходных транзисторов .....	146
Проверка и отладка.....	146
О мощности и качестве звуковых усилителей .....	148

**ГЛАВА 9. ПРАВИЛЬНОЕ ПИТАНИЕ — ЗАЛОГ ЗДОРОВЬЯ**

<b>О питании электронных устройств .....</b>	<b>151</b>
Электрохимические элементы.....	151
Аккумуляторы.....	155
Вторичные линейные источники питания.....	159
Трансформаторы.....	159
Расчет сетевого трансформатора.....	161
Простейший нестабилизированный однополярный источник питания.....	163
Стабилизаторы .....	166
Интегральные стабилизаторы.....	168
Однополярный регулируемый источник питания.....	170
Рассеивание тепла.....	175
Принудительное охлаждение и элементы Пельтье.....	178
Импульсные источники питания .....	181
Как правильно питаться? .....	185

**ГЛАВА 10. ТЯЖЕЛОВЕСЫ**

<b>Устройства для управления мощной нагрузкой.....</b>	<b>189</b>
Базовая схема регулирования напряжения на нагрузке .....	190
Мощность в нагрузке при тиристорном управлении.....	193
Ручной регулятор мощности.....	195
Устройство плавного включения ламп накаливания.....	201
Помехи.....	202

**ГЛАВА 11. СЛАЙСЫ, КОТОРЫЕ СТАЛИ ЧИПАМИ**

<b>О микросхемах .....</b>	<b>205</b>
Некоторые типовые узлы микросхем и особенности их эксплуатации .....	208
Звуковые усилители на микросхемах.....	214
Мощный УМЗЧ.....	214
Микроусилитель мощности .....	218

**ГЛАВА 12. САМЫЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ**

<b>Обратная связь и операционные усилители.....</b>	<b>221</b>
Опасные связи.....	222
Основные свойства системы с отрицательной обратной связью.....	226
Базовые схемы усилителей на ОУ.....	228
Неидеальность ОУ, ее последствия и борьба с ними .....	230
Дифференциальные усилители .....	232
Другие распространенные схемы на ОУ .....	235
Аналоговый генератор .....	237
Конструируем термостаты.....	239
Термостат вообще.....	240
Простой термостат для аквариума .....	243
О гистерезисе .....	247
Терморегулятор «для дома для семьи» .....	249

**ГЛАВА 13. КАК ИЗМЕРИТЬ ТЕМПЕРАТУРУ?**

<b>Электронные термометры.....</b>	<b>255</b>
Основы термометрии .....	255
Датчики.....	257
Термисторы .....	257
Металлические датчики .....	259
Полупроводниковые датчики .....	260
Методы измерения сопротивления .....	261
Очень точный ручной измеритель температуры.....	262
Простейшие электронные термометры на батарейке.....	264
Электронный термометр со стрелочным индикатором.....	265
... и с цифровым .....	267
Немного о метрологии и ошибках аналоговых схем.....	269
Точность и разрешающая способность.....	270
Систематические ошибки.....	271
Случайные ошибки измерения и их оценка.....	272
Регрессия и метод наименьших квадратов .....	277
Разновидности погрешностей.....	279

**ЧАСТЬ III. ЦИФРОВОЙ ВЕК..... 281****ГЛАВА 14. НА ПОРОГЕ ЦИФРОВОГО ВЕКА****Математическая логика и ее представление в технических устройствах..... 283**

Основные операции алгебры Буля .....	285
Булева алгебра на выключателях и реле .....	288
То же самое, но на транзисторах и диодах .....	291
О двоичной и других системах счисления.....	293
Позиционные и непозиционные системы счисления. Десятичная система.....	294
Двоичная и шестнадцатеричная системы .....	296
Перевод из одной системы счисления в другую .....	298
Байты.....	300
Запись чисел в различных форматах.....	302
Немного двоичной арифметики .....	303
Отрицательные двоичные числа.....	304
Дробные числа .....	306
Коды, шифры и дешифраторы.....	307

**ГЛАВА 15. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ИЛИ ИГРА В КВАДРАТИКИ****Устройство логических микросхем и двоичные операции..... 311**

Сравнение основных характеристик ТТЛ и КМОП .....	312
ТТЛ .....	312
КМОП .....	314
Характеристики различных серий КМОП.....	316
Двоичный сумматор на логических микросхемах .....	323
Обработка двоичных сигналов с помощью логических элементов .....	328
Мультиплексоры/демультиплексоры и ключи.....	331

<b>ГЛАВА 16. УСТРОЙСТВА НА ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ</b>	
<b>Мультивибраторы, формирователи, триггеры, счетчики.....</b>	<b>333</b>
Генераторы.....	333
Кварцевые генераторы.....	338
Формирователи импульсов.....	341
Одновибраторы.....	344
О токоограничивающих резисторах в импульсных схемах.....	346
Триггеры, регистры и счетчики.....	346
Самый простой триггер.....	347
D-триггеры.....	350
Регистры.....	351
Счетчики.....	353
Цифровой лабораторный генератор.....	358
<b>ГЛАВА 17. ОТКУДА БЕРУТСЯ ЦИФРЫ</b>	
<b>Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи.....</b>	<b>363</b>
Принципы оцифровки сигналов.....	365
ЦАП.....	368
АЦП.....	373
АЦП параллельного действия.....	373
АЦП последовательного приближения.....	373
Интегрирующие АЦП.....	375
Конструируем цифровой термометр.....	384
АЦП 572ПВ2 и ПВ5.....	384
Практическая схема термометра.....	389
<b>ЧАСТЬ IV. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ.....</b>	<b>395</b>
<b>ГЛАВА 18. НАЧАЛА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ</b>	
<b>Микропроцессоры, память и микроконтроллеры.....</b>	<b>397</b>
Как работает микропроцессор?.....	399
Лечение амнезии.....	406
Изобретаем простейшую ROM.....	407
Общее устройство памяти.....	409
RAM.....	410
EPROM, EEPROM и flash-память.....	411
Микроконтроллеры Atmel AVR.....	416
Почему AVR?.....	416
Classic, Mega и Tiny.....	417
Структура МК AVR.....	418
Память программ.....	419
Память данных (ОЗУ, SRAM).....	419
Энергонезависимая память данных (EEPROM).....	421
Способы тактирования.....	422
Параллельные порты ввода/вывода.....	424
Прерывания.....	425
Таймеры-счетчики.....	427
Последовательные порты.....	429

**ГЛАВА 19. ПЕРСОНАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР ВМЕСТО ПАЯЛЬНИКА**

<b>О программировании МК .....</b>	<b>431</b>
Железо .....	431
Софт .....	434
О конфигурационных битах .....	436
Примеры программирования .....	439
Самая простая программа .....	439
Таймер без прерываний .....	442
Применение прерываний .....	446
Прерывание таймера по переполнению .....	449
Прерывание таймера по сравнению .....	452

**ГЛАВА 20. ИЗОБРЕТАЕМ ВЕЛОСИПЕД**

<b>Настольные часы и термометр-барометр на микроконтроллере .....</b>	<b>457</b>
Часы со счетом времени на МК .....	458
Общее построение схемы .....	458
Схема .....	460
Программа .....	464
Детали и конструкция .....	467
Измеритель температуры и давления на AVR .....	469
Арифметика многобайтовых чисел в МК .....	469
Операции с числами в формате BCD .....	473
Хранение данных в ОЗУ .....	474
Использование встроенного АЦП .....	476
Датчики температуры и давления .....	477
Схема .....	478
Программа .....	481
Калибровка .....	483

**ГЛАВА 21. ОСНОВЫ ARDUINO**

<b>Среда программирования и практика построения схем .....</b>	<b>487</b>
Что такое Arduino? .....	488
Установка среды программирования Arduino .....	490
Настройки Arduino IDE .....	493
Программы для Arduino .....	494
Термостат на Arduino .....	496
Обмен через последовательный порт .....	500
Работа с текстом на графическом дисплее MT-12864J .....	504
Подключение MT-12864J .....	504
Русификация модуля MT-12864J .....	507

**ГЛАВА 22. МЕТЕОСТАНЦИЯ НА ARDUINO**

<b>Как на Arduino делать устройства лучше фирменных .....</b>	<b>511</b>
Техническое задание .....	512
Выбор компонентов и схема станции .....	513
Подключение строчных OLED-дисплеев .....	513
Контроллер WS0010 .....	516
Пишем по-русски .....	517
Подключение библиотеки LiquidCrystal .....	519



Часы реального времени DS-1307.....	520
Установка часов .....	521
Температура, влажность и давление .....	523
Подключение радиомодулей Xbee .....	524
Подключение и настройка Xbee-модулей.....	525
Выносной датчик на основе Arduino Mini.....	528
Схема выносного датчика .....	531
Версия станции с ЖК-дисплеем .....	534
Запись на SD-карту и программа станции с OLED-дисплеем .....	536
Работа метеостанции с функциями записи на SD-карту .....	537
Конструкция .....	538
О недостатках Arduino .....	540
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>543</b>
<b>Приложение 1. Резисторы.....</b>	<b>545</b>
Международная цветная маркировка резисторов.....	545
Таблицы номиналов резисторов и конденсаторов.....	546
<b>Приложение 2. Стандартные обозначения, размеры и характеристики некоторых гальванических элементов .....</b>	<b>547</b>
<b>Приложение 3. Классы усилителей .....</b>	<b>549</b>
Действующее значение напряжения .....	549
Классы усилителей .....	550
<b>Приложение 4. Соответствие наименований и функциональности некоторых зарубежных и отечественных цифровых микросхем .....</b>	<b>554</b>
<b>Приложение 5. Словарь часто встречающихся аббревиатур и терминов .....</b>	<b>557</b>
<b>Приложение 6. Единицы измерения и обозначения.....</b>	<b>562</b>
Физические величины и их единицы измерения по умолчанию .....	562
Приставки и множители для образования десятичных кратных и дольных единиц .....	563
Некоторые буквенные обозначения в электрических схемах.....	563
Некоторые символические обозначения в электрических схемах .....	564
Символические обозначения мощности резисторов на схемах.....	567
<b>Литература .....</b>	<b>568</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>570</b>

## К читателю

Как известно, каждый сходит с ума по-своему. Есть люди, сдвинутые на собирании спичечных этикеток или монет, есть те, кто прыгает с парашютом, лазает по городской канализации или спускается на плотках по горным рекам Северного Урала и Сибири. Одна из самых распространенных разновидностей подобных психических сдвигов — радиолобительство.

Когда-то радиолюбители были действительно только «любителями радио» — просто потому, что в 20–30-х годах XX века, когда появились первые энтузиасты, кроме радиоэлектроники, почти никакой другой электроники не существовало. О, в те времена это было жутко престижное хобби! Это сейчас мы, не успев привыкнуть к магнитолам в каждом автомобиле и двум-трем телевизорам в каждой квартире, как незаметно для себя оказались в мире глобальных электронных коммуникаций. А тогда сама возможность слушать кого-то с другого конца Земли казалась чудом, магическим действием. Даже настройка на нужную станцию простого домашнего приемника, ставшего к тридцатым годам уже довольно обычным атрибутом не только в богатой Америке, но и в СССР, поначалу вызывала не меньше вопросов, чем сейчас установка Windows на персональный компьютер.

Но довольно быстро — начиная с 1940-х годов — электроника стала «широко протирать руки свои в дела человеческие». Термин «радиолобительство» сохранился и по сей день, но под ним стали понимать уже отнюдь не только увлечение радиопередатчиками и приемниками. Первым делом выделилась в отдельное направление звукозапись и все с ней связанное: различные усилители, эквалайзеры, акустические устройства. Затем электроника вторглась в электротехнику и управление разными механизмами. Потом начался компьютерный бум, и стало модным все, связанное с информационными технологиями (вообще-то в них, по справедливости, следовало бы включить и радио с телевидением). Заметим, что в развитии ИТ-отрасли любители сыграли не последнюю роль — так, из увлечения Стива Возняка конструированием игровых приставок выросла компания Apple, теперь одна из самых известных и дорогих компаний мира. А из сообщества любителей программирования родилось течение «открытых исходников» (Open Source), в существенной мере определяющее ландшафт современного ИТ-мира.

В результате первоначально единая наука о применении электричества в технике разделилась на множество течений, значительная часть которых уже к собственно

электричеству имеет лишь косвенное отношение. Выдающийся советский ученый Сергей Алексеевич Лебедев, один из создателей отечественной компьютерной промышленности, начинал с проектирования устойчивых энергосистем (т. е. с чисто электротехнических задач), а к концу своей творческой деятельности занимался уже проблемами операционных систем для сверхмощных вычислительных комплексов.

В настоящее время не более одной пятой части объема журнала «Радио», выходящего в нашей стране с 1924 года, посвящено именно радио. Следовало бы придумать иное название, но слово «радиолобитель» прижилось и ныне означает любого, кто увлекается электроникой. Правда, так только по-русски — например, в английском языке все иначе: в нем radio ham (или на жаргоне просто ham) есть только лишь «оператор любительской радиостанции», а для любителей электроники (amateurs electronics) вообще нет никакого специального термина. Только не думайте, что в Англии или в Штатах таких любителей вовсе нет, просто там это хобби традиционно имело несколько иной статус. В последние годы число таких amateurs на Западе растет опережающими темпами — возникли даже целые отрасли промышленности, выпускающие полуфабрикаты и конструкторы для любителей создания самых разных электронных изделий. Одним из самых ярких примеров может стать конструирование «интеллектуальных» роботов — в быту, за пределами военных и промышленных сфер применения, примеры массово выпускающихся роботов пока еще можно пересчитать по пальцам. Зато любительских конструкций создано неисчислимо количество: по отдельным разновидностям «умных роботов» проводятся даже чемпионаты мира — совсем, как когда-то по любительской радиосвязи.

Потому не удивляйтесь, что в этой книге, адресованной начинающим (и просто желающим повысить свою квалификацию) радиолобителям, о радио вы вообще не прочтете ни слова. Зато довольно часто будут упомянуты компьютеры — по причинам, которые вы поймете, прочитав эту книгу. Так что же такое радиолобительство?

## Радиолобительство — что это такое?

Чем отличается «электронное» устройство от «электрического»? Оба они используют электрическую энергию, однако электрическое устройство, как правило, не содержит никаких заумных штучек, вроде транзисторов или микросхем, — простейшим примером электрического (электротехнического) устройства в чистом виде является настольная лампа с выключателем. Но та же лампа, снабженная регулятором яркости или бесконтактным сенсорным выключателем, является уже устройством электронным. Электронными устройствами по сути стали и давно известные люминесцентные лампы — теперь во многие из них встроена довольно серьезная схема, управляющая запуском и свечением. А в таких сложных электротехнических устройствах, как, например, современные генераторы энергии или системы электропривода, электронную часть от электротехнической уже отделить невозможно.

Эту тенденцию легко проследить на примере эволюции автомобильных электросистем, где первоначально генератор электроэнергии совместно с электромеханическим регулятором и аккумулятором представлял собой отдельную вспомогательную систему, при выходе из строя которой автомобиль тем не менее можно было

завести «ручкой» и заставить передвигаться. Нарастание количества электронных узлов в конце концов связало электротехнические компоненты (стартер, генератор, аккумулятор), электронные устройства (электронное зажигание, датчики, контроллеры, вплоть до бортового компьютера) и механические узлы (двигатель с трансмиссией) в неразрывное целое, где ни одна из систем не может функционировать без другой. А некоторые последние модели автомобилей высшего класса фактически уже ближе к роботам, а не к просто автомашинам, т. е. представляют собой самый сложный электронно-программно-механический агрегат (пример — модели «Вольво», оборудованные системой Drive Me).

Занятие радиолобительством в нашей стране некоторое время назад, в 1960–1980-е годы, было не просто модным, а очень модным. Этому способствовало много причин: и относительно высокий уровень технического образования, и бесплатный доступ к компонентам (да-да, купить в свободной продаже что-то электронное было очень сложно, а вот вынести с завода или из НИИ — всегда пожалуйста), и, наконец, то, что промышленность явно не справлялась с обеспечением потребности населения в «продвинутых» бытовых приборах, а качество тех, что выпускались, чаще всего, было ниже всякой критики. Дешевле, лучше и интереснее было сделать самому. Поэтому в те времена стать меломаном в смысле «любителем качественной звукозаписи» означало фактически, что человек был вынужден сам изучать азы электроники и браться за паяльник («махать паяльной косой», как любил выражаться один мой знакомый).

Положение, конечно, резко изменилось с приходом в страну дешевого и качественного ширпотреба с Запада и Востока, и теперь уже вряд ли кто будет самостоятельно изобретать, скажем, карманный плеер-«дебильник». Но, как ни странно, радиолобительство не только не погибло, но даже расцвело — прежде всего потому, что стали доступны, пусть и за деньги, практически любые, как импортные, так и отечественные компоненты, и, что немаловажно, исчерпывающая документация к ним — в 70-е годы прошлого века какой-нибудь «Справочник по транзисторам» сметали с прилавков со скоростью, которой могли бы позавидовать сами братья Стругацкие. Популярная сеть электронных супермаркетов «Чип и Дип», ориентированная в основном на радиолобителей, недаром хвастается миллионом посетителей в год...

Мудрый римлянин Публий Корнелий Тацит в свое время промолвил: «Можно восхищаться древностью, но следовать нужно современности». Он был совершенно прав, но сам остался в веках именно благодаря своим историческим трудам. «Восхищение древностью» как ничто другое помогает «следовать современности». Например, если покопаться в истории науки и техники, то выясняется интересная вещь — почти все эпохальные изобретения и открытия делались дилетантами. Чаще всего это было обусловлено тем, что до них соответствующих направлений просто не существовало, и они вынуждены были все изобретать «с нуля». Крайний случай такого «любительства» — изобретение телеграфа Сэмюэлом Морзе (рис. 1), который вообще не имел никакого — даже самостоятельного — технического образования и до начала работы над телеграфом был признанным художником. Были и другие, не менее интересные случаи.



Рис. 1. Сэмюэл Морзе (Morse, Samuel F., 1791–1872), автопортрет, 1818 г.

В области электроники существует некая иерархия знаний, в которой неявно подразумевается, что при переходе от одной ступеньки к следующей знания предыдущего уровня усвоены в полной мере. Например, в радиолобительской литературе четвертьвековой давности вы могли встретить подробнейшее описание принципов работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП), ибо их собирали из отдельных деталей, и без понимания их устройства такая работа просто не могла быть успешной. Сейчас АЦП всем доступны и в виде законченных микросхем, и в составе микроконтроллеров, управляются они программно, и, казалось бы, понимание принципов их функционирования уже никому не требуется — подавай нужные команды в соответствии с инструкцией, и все будет работать.

Это верно только на первый поверхностный взгляд. Никакие инструкции вам не заменят глубокого понимания принципов работы электронных компонентов. При условии, конечно, что вы хотите подойти к проектированию своих устройств творчески и что-то изобрести самостоятельно, а не тупо скопировать готовую конструкцию. В последнем случае вам эта книга не потребуется — вполне достаточно сборников радиолобительских схем, которые ныне доступны каждому через Интернет. Для особо ленивых многими фирмами выпускаются готовые конструкторы с подробной пошаговой инструкцией. Но вот как только вы захотите чужую схему приспособить к своим нуждам, модифицировать или хотя бы просто заменить детали более доступными и современными, без понимания принципов работы вы окажетесь в тупике.

Вообще говоря, без ряда фундаментальных знаний: от школьной физики до понимания того, как работают выходные каскады цифровых микросхем (а значит, и знания принципов работы транзисторов и других компонентов), — невозможно даже правильно подсоединить светодиод к микроконтроллеру. Можно скопировать чужое подключение, но никогда нет уверенности, что и сам автор схемы все сделал

правильно. Развивая эту мысль, можно утверждать, что без знания закона Ома написать корректно работающую программу для микроконтроллера можно только случайно, и пусть это не покажется вам таким уж большим преувеличением.

Поэтому мы дадим совет, который может показаться несколько неожиданным. Но сначала попробуйте мысленно ответить на один вопрос, каким бы идиотским он вам ни казался: «Какова величина тока в комнатной розетке?» То, что этот вопрос — отнюдь не столь прост, как кажется, доказывают результаты ответов на него, полученные после опроса группы студентов одного технического вуза (по специальности, не связанной напрямую с электротехникой или электроникой), — из нескольких десятков опрошенных только двое смогли дать вразумительный ответ.

Итак, если вы, читатель, замялись с ответом или просто не уверены в нем, то вот обещанный совет, причем адресованный любому независимо от возраста, — прежде чем читать дальше, возьмите учебники физики за седьмой и восьмой классы и перечитайте главы, посвященные электричеству. Можете также захватить из девятого класса главу, посвященную строению атома. Еще лучше обратиться не к обычным школьным учебникам, а изучить соответствующие главы из учебника Г. С. Ландсберга [1], где то же самое изложено куда более увлекательно и подробно. Хотя ряд элементарных сведений и дается в первых главах книги, которую вы держите в руках, вам будет много легче читать ее дальше.

## Как пользоваться книгой?

Несколько слов о том, как пользоваться книгой. Она рассчитана на тех, кто делает все своими руками и дома (поэтому, например, я не рекомендую компоненты для поверхностного монтажа — платы под них своими руками изготовить достаточно сложно, и еще труднее их отлаживать). Для тех, кто уже имеет известный опыт работы и оборудованную домашнюю лабораторию, первые главы можно пропустить, хотя главу 6 о транзисторах я все же прочесть рекомендую. Книга отличается от большинства имеющихся руководств тем, что почти все описанные в книге схемы подробно рассмотрены шаг за шагом, включая самые мелкие детали, — так, чтобы при повторении конструкции у вас не возникало вопросов, зачем нужен тот или иной резистор и почему его сопротивление именно такое.

Однако, чтобы вопросов действительно возникало как можно меньше, при чтении книги следует проверять все рассуждения и расчеты с карандашом и калькулятором<sup>1</sup>. В процессе чтения вам, вероятно, придется возвращаться к уже освоенным главам. Логика построения книги подчинена принципу постепенного усложнения конструкций, но в то же время широко используется метод опережающего изложения — скажем, операционные усилители и обратная связь подробно рассматриваются только в главе 12, но примеры их использования вы сможете встретить уже в главах 9 и 10. Опыт показывает, что такой прием очень способствует усвоению информации — уже немного знакомое легче изучать подробно, чем незнакомое

---

<sup>1</sup> Вдруг и ошибки найдете? Пишите, буду очень благодарен.

вовсе. С другой стороны, не удивляйтесь, что звуковой усилитель подробно рассмотрен в *главе 8*, а источник питания для него — только в следующей главе. Сведения из этих глав во многом пересекаются между собой, поэтому, прежде чем браться за реальный усилитель, вам придется прочесть обе главы.

Книга несамодостаточна — для того, чтобы повторить многие конструкции, вам потребуется дополнительный справочный материал, например, по разводке выводов транзисторов или иных компонентов, а для работы с последней частью книги, посвященной микроконтроллерам, обязательно нужно иметь фирменное описание микропроцессоров AVR и системы команд для них. Слава Богу, у нас теперь есть Интернет, так что можно и не забивать шкаф справочниками, но кое-что, особенно по отечественным компонентам, все же потребуется иметь на полке — не будешь же лазить в Сеть за описанием каждого транзистора!

Не нужно рассматривать любую схему из этой книги или из других источников, как что-то вроде текста из Библии, который никому не позволено изменять. Даже рекомендации производителей по включению того или иного компонента есть всего лишь рекомендации. Можно и нужно экспериментировать, изменяя параметры компонентов и подгоняя схему к своим условиям, нелишне и поспорить с автором, если то или иное решение кажется чересчур усложненным. Однако стоит делать это разумно — если вы замените в схеме генератора частоты тип времязадающего конденсатора с K73 на K50, то можете быть весьма удивлены результатами. То же самое может произойти, например, если вы, не глядя, замените рекомендуемый операционный усилитель MAX474 похожим на него по выводам, но предназначенным совершенно для других целей MAX473.

## Как разрабатывать электронные схемы?

И, наконец, рискуя утомить читателя, все же скажу несколько слов о том, как вообще следует разрабатывать и отлаживать схемы. Самый эффективный метод — «сборка» нужной схемы из готовых и заранее отлаженных фрагментов. Эта операция аналогична тому, как программисты «собирают» программы из готовых и заранее отлаженных библиотечных процедур. Каждая такая процедура есть «черный ящик», у которого имеются входы и выходы для общения с другими частями программы, причем в общем случае вы даже не знаете, как она устроена внутри — точно так же, как вы не знаете, что именно размещается внутри микросхемы. Вы берете микросхему, подсоединяете к ней внешние элементы в соответствии с рекомендациями производителя и получаете готовый узел, который соединяете с другими подобными узлами.

Повторим, что именно на этой стадии можно сильно «попасть», если вообще отказаться от попыток понять, как работают используемые узлы, и лишь тупо следовать рекомендациям производителя, которые по понятным причинам не исчерпывают всего разнообразия жизненных ситуаций. Лучше всего, если производитель предлагает не только описания компонентов (datasheets), но и рекомендации по их применению (application notes) — в этом случае их совсем не вредно изучить перед проектированием. Практика предоставления рекомендаций производителей по проектированию типовых узлов — давно уже не исключение, а правило, потому элементарное знание

технического английского становится обязательным условием для любого более-менее грамотного радиолюбителя. Для облегчения преодоления этого порога в конце книги приведен словарь специфических терминов и аббревиатур (см. приложение 5).

При рисовании схемы обязательно обозначайте на ней конкретные типы и значения параметров элементов — не откладывайте это до выполнения практической ее отладки. Изменить эти параметры вы всегда сможете, но все, что можно посчитать, нужно посчитать заранее — это сохранит вам очень много времени. Когда вы берете, наконец, паяльник в руки, то не следует сразу собирать всю схему устройства целиком. Разбейте ее на как можно более мелкие самостоятельно работающие узлы и отлаживайте каждый узел по отдельности. Не верьте печатному слову и все рекомендации из литературы проверяйте на макетах (в конце концов у вас образуется библиотека таких самостоятельно отлаженных узлов, и вы будете экономить огромное количество времени). Отладив все, обязательно нанесите на чертеж схемы полученные в результате отладки точные значения компонентов (те, что все еще требуют окончательной подгонки «по месту», обозначаются звездочкой), проверьте правильность соединения этих узлов и разводку питания и только затем собирайте всю схему целиком — сначала на макетной плате. И только убедившись в работоспособности макета схемы, переносите ее на настоящую рабочую плату.

В отличие от большинства радиолюбительских изданий, рисунки плат в книге не приводятся, чему есть много причин: во-первых, повторить конструкцию в точности с теми компонентами, которые приведены в описании, как правило, не получается, да это и совершенно не требуется. Во-вторых, лично я никогда не повторял опубликованных конструкций в точности, стараясь улучшить или упростить схему, и в этой книге вы почти всегда найдете рекомендации по улучшению характеристик или расширению функциональности описанного прибора, так что публикация рисунка платы вообще теряет смысл. Наконец, есть и еще один момент, скорее психологический — раскладывая плату самостоятельно, вы намного лучше вникаете в работу схемы, после чего отладка и регулировка ее значительно упрощаются. Мое глубокое убеждение состоит в том, что плату нужно делать самостоятельно, под выбранную конструкцию и корпус, а не подгонять габариты под имеющуюся плату, — в результате такой подгонки самодельные конструкции иногда получаются весьма уродливыми. Исключением будут схемы на основе готовых узлов (таких, например, как Arduino и аксессуары к нему — см. главы 21 и 22), но там раскладывать платы самостоятельно и не требуется.

Если вы разрабатываете серьезный прибор, который должен служить годами, — постарайтесь заложить в разработку время и деньги, необходимые для выполнения следующих этапов:

- **разработка технического задания** с возможно более подробным описанием требуемой функциональности. Не пренебрегайте мелочами, особенно если вы работаете «на сторону», а не для себя — так, будет очень печально, если вы собрали и проверили прибор дома на столе, а потом выяснится, что он должен работать круглогодично на улице;
- **разработка принципиальной схемы** с отладкой отдельных узлов на макетах;



- **изготовление полного макета** и его отладка;
- **разработка окончательной принципиальной схемы**, подбор деталей и разработка печатной платы;
- **изготовление опытного образца** и его отладка, корректировка печатной платы;
- **изготовление окончательного варианта** печатной платы, корпуса и монтаж прибора.

Отдельно стоит остановиться на составлении технического описания и инструкции по эксплуатации. Я знаю, что большинство разработчиков искренне ненавидит этот этап работы (то же относится, увы, и к программистам), но советую себя пересилить и начинать составление документации прямо сразу, одновременно с началом проектирования. Во-первых, при попытке описать словами «как это работает» в расчете на стороннего читателя обычно всплывают все недостатки и упущения. Иногда на примере некоторых изделий бытовой техники или пользовательских программ отчетливо видно, что их разработчики сами никогда и не пытались взглянуть на свое творение с точки зрения того, кто это будет применять на практике, а инструкцию по эксплуатации писали наспех совершенно другие люди. Вот этого и следует по возможности избегать. Во-вторых, с уверенностью можно сказать, что через пару лет вы напрочь забудете, как у вас работал данный узел и почему выбраны именно такие компоненты. Поэтому написание технической документации нужно вам самим не меньше, чем пользователю.

Приведенный идеальный вариант последовательности разработки редко осуществим на практике — либо времени не хватает, либо денег, либо того и другого. Есть одна известная фирма, которая занимается разработкой заказных электронных устройств, — так там берут несколько килобаксов только за написание технического задания. И они правы! Но на практике часто получается так, что макетный либо опытный образец становится и окончательным изделием. И все же по мере возможности не пренебрегайте этими промежуточными этапами — поверьте, так получится намного быстрее, чем, зажмурившись, собрать все сразу, а потом в лучшем случае обнаружить, что ничего не работает, а в худшем — выветривать из комнаты очень неприятный и стойкий запах горелой пластмассы. Учтите, что почти ни одна незнакомая дотоле схема никогда не работает сразу — будьте к этому готовы и заранее наберитесь терпения.

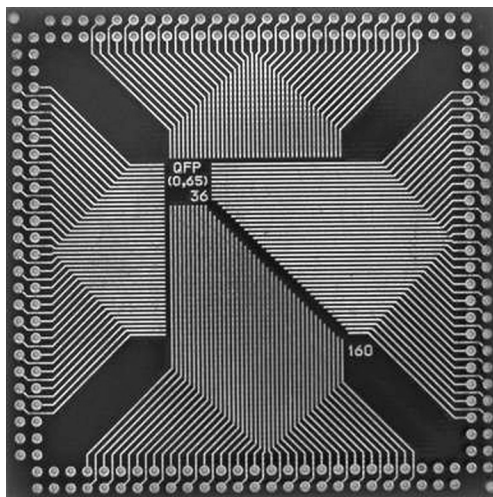
Итак, приступим.

*Юрий Ревич, revich@lib.ru*

\* \* \*

Автор выражает искреннюю благодарность администрации интернет-магазина «Амперка» ([amperka.ru](http://amperka.ru)) за поддержку подготовки глав, посвященных платформе Arduino.

Схемы, чертежи и фотографии компонентов подготовлены автором. Все остальные иллюстрации взяты из источников, допускающих свободное копирование, за исключением фотографии первого транзистора из главы 6 и портрета Клода Шеннона из главы 14, любезно предоставленных автору корпорацией Lucent Technologies Inc./Bell Labs в лице ее сотрудницы Франциски Мэттьюз (Francisca Matthews).

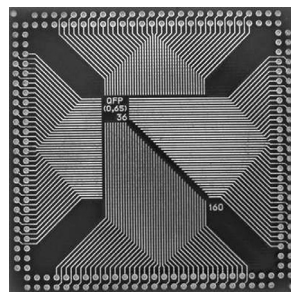


# ЧАСТЬ I

## ОСНОВЫ ОСНОВ

- Глава 1.** Чем отличается ток от напряжения?
- Глава 2.** Джентльменский набор  
Оборудуем домашнюю лабораторию
- Глава 3.** Хороший паяльник — половина успеха  
Инструменты и технологические советы
- Глава 4.** Тригонометрическая электроника  
О частотах, периодах, мощности, переменных напряжениях и токах  
и немного о сигналах
- Глава 5.** Электроника без полупроводников  
Резисторы, конденсаторы и схемы на их основе
- Глава 6.** Изобретение, которое потрясло мир  
Диоды, транзисторы и простейшие схемы на их основе
- Глава 7.** Ошеломляющее разнообразие электронного мира  
Реле, стабилитроны, светодиоды...

# ГЛАВА 1



## Чем отличается ток от напряжения?

Поэтому-то мне будет легче, *facilius natans*, взять тему по моему выбору, которая для этих трудных вопросов богословия явилась бы тем же, чем мораль является для метафизики и философии.

*А. Дюма. Три мушкетера*

Дурацкий вопрос, скажете вы? Отнюдь. Опыт показал, что не так уж и много людей могут на него ответить правильно. Известную путаницу вносит и язык: в выражении «имеется в продаже источник постоянного тока 12 В» смысл искажен. На самом деле в данном случае имеется в виду, конечно, источник напряжения, а не тока, поскольку ток в вольтах не измеряется, но так говорить не принято. Самое правильное будет сказать — «источник питания постоянного напряжения 12 вольт», а написать можно и «источник питания =12В», где символ «=» обозначает, что это именно постоянное напряжение, а не переменное. Впрочем, и в этой книге мы тоже иногда будем «ошибаться» — язык есть язык.

Чтобы разобраться во всем этом, для начала напомним строгие определения из учебника (зазубривать их — весьма полезное занятие!). Итак, *ток*, точнее, его величина, есть *количество электрического заряда, протекающее через сечение проводника за единицу времени*:  $I = Q/t$ . Единица тока называется «ампер», и ее размерность в системе СИ — кулоны в секунду. Знание сего факта пригодится нам позднее.

Куда более запутанно выглядит определение напряжения — *величина напряжения есть разность электрических потенциалов между двумя точками пространства*. Измеряется она в вольтах, и размерность этой единицы измерения — джоуль на кулон, т. е.  $U = E/Q$ . Почему это так, легко понять, вникнув в смысл строгого определения величины напряжения: *1 вольт есть такая разность потенциалов, при которой перемещение заряда в 1 кулон требует затраты энергии, равной 1 джоулю*.

Все это наглядно можно представить себе, сравнив проводник с трубой, по которой течет вода (и это будет довольно точная аналогия). При таком сравнении величину тока можно себе представить, как количество (расход) протекающей воды за се-

кунду, а напряжение — как разность давлений на входе и выходе трубы. Чаще всего труба заканчивается открытым краном, так что давление на выходе равно атмосферному давлению, и его можно принять за нулевой уровень. Точно так же в электрических схемах существует общий провод (или «общая шина» — в просторечии для краткости ее часто называют «землей», хотя это и не точно — мы еще вернемся к этому вопросу позднее), потенциал которого принимается за ноль и относительно которого отсчитываются все напряжения в схеме. Обычно (но не всегда!) за общий провод принимают минусовой вывод основного источника питания схемы.

Итак, вернемся к вопросу, сформулированному в заголовке: так чем же отличается ток от напряжения? Правильный ответ будет звучать так: ток — это количество электричества, а напряжение — мера его потенциальной энергии. Неискушенный в физике собеседник, разумеется, начнет трясти головой, пытаясь вникнуть, и тогда можно дать такое пояснение. Представьте себе падающий камень. Если он маленький (количество электричества мало), но падает с большой высоты (велико напряжение), то он может наделать столько же несчастий, сколько и большой камень (много электричества), но падающий с малой высоты (напряжение невелико).

## Связь тока и напряжения

На самом деле аналогия с камнем наглядна, но не точна — труба с текущей жидкостью подходит куда больше. Дело в том, что напряжение и ток обычно связаны между собой. (Слово «обычно» я употребил потому, что в некоторых случаях — в источниках напряжения или тока — от этой связи стараются избавиться, хотя полностью никогда и не удается.) В самом деле, если вернуться к нашей трубе, то легко представить, как с увеличением давления (напряжения) увеличивается количество протекающей жидкости (ток). Иначе зачем нужны были бы насосы? Сложнее представить себе наглядно обратную зависимость — как ток влияет на напряжение. Для этого нужно сначала понять, что такое *сопротивление*.

Вплоть до середины XIX века физики не знали, как выглядит зависимость тока от напряжения. Этому есть одна важная причина. Попробуйте сами экспериментально выяснить, как выглядит график этой зависимости. Схема эксперимента приведена на рис. 1.1, а примерные результаты — на рис. 1.2. Показанные на графике результаты весьма приблизительны, т. к. реальный вид кривой сильно зависит от того, как именно выполнен подопытный проводник («П» на рис. 1.1) — плотно или редко он намотан, на толстый массивный каркас или на тонкий стакан из бумаги, а также от температуры в комнате, наличия сквозняка и еще от множества других причин. Именно такое непостоянство и смущало физиков — не только сама кривая загибается (т. е. ток в общем случае непропорционален напряжению), но вид и форма этого загиба весьма непостоянны и меняются как при изменении условий внешней среды, так и для различных материалов.

Понадобился гений Георга Ома, чтобы за всеми этими деревьями увидеть настоящий лес — а именно понять, что зависимость тока от напряжения описывается элементарно простой формулой:  $I = U/R$ , а все несуразности, упомянутые ранее, проистекают от того, что величина сопротивления  $R$  зависит от материала провод-

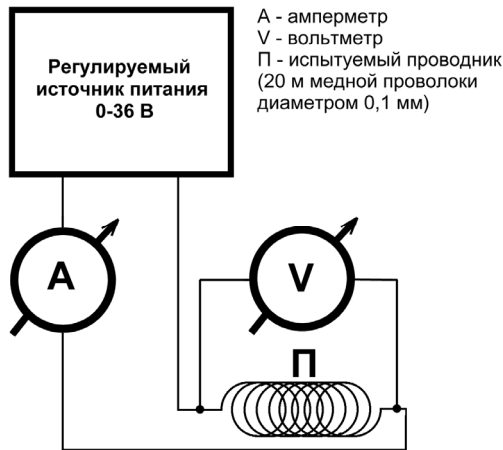


Рис. 1.1. Схема эксперимента по проверке закона Ома

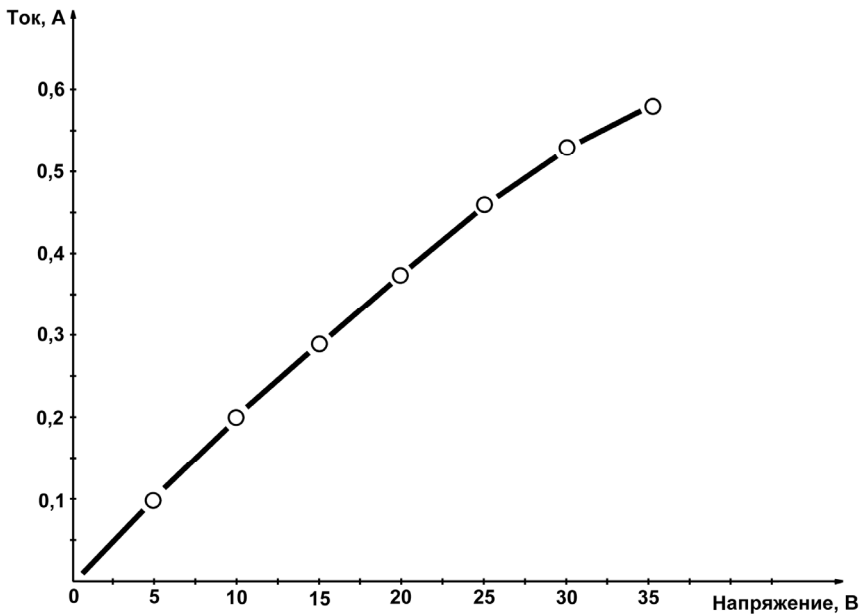
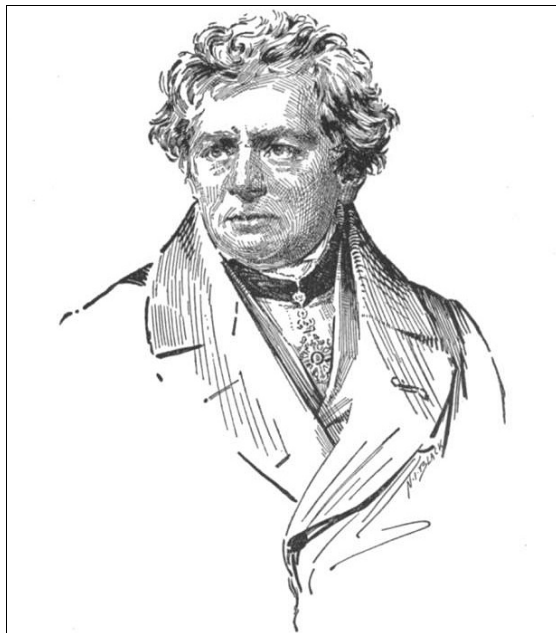


Рис. 1.2. Примерные результаты проверки закона Ома

ника и от условий внешней среды, в первую очередь от температуры. Так, в нашем эксперименте загиб кривой вниз происходит потому, что при прохождении тока проводник нагревается, а сопротивление меди с повышением температуры увеличивается (примерно на 0,4 % с каждым градусом изменения температуры). А вот сама величина этого нагрева зависит от всего, чего угодно, — намотайте провод поплотнее и заверните его в асбест — он будет нагреваться сильнее, а размотайте его и поместите на сквозняк — нагрев резко уменьшится.

В знак признания заслуг Георга Ома (рис. 1.3) единица измерения сопротивления так и называется — ом (ohm по-английски). Согласно формуле, приведенной в пре-

дыдущем абзаце,  $1 \text{ Ом}$  есть сопротивление такого проводника, через который течет ток в  $1 \text{ А}$  при напряжении на его концах, равном  $1 \text{ В}$ . Обратная сопротивлению величина называется проводимостью и измеряется в сименсах, названных так в честь другого немецкого ученого, электротехника и предпринимателя Вернера фон Сименса:  $1 \text{ См} = 1/\text{Ом}$ . В электронике почти всегда оперируют именно величиной сопротивления, так что сименсы мы оставим для физиков.



**Рис. 1.3.** Георг Симон Ом (1787–1854) — немецкий физик, член-корреспондент Берлинской АН. Окончил Эрландский университет. Преподавал математику, затем физику в различных гимназиях. С 1833 года — профессор Нюрнбергской высшей политехнической школы. В 1849–1852 годах — ректор Мюнхенского университета. Член Лондонского королевского общества

### **ЗАМЕТКИ НА ПОЛЯХ**

Обратите внимание, что *название* единицы измерения «ом» мы пишем со строчной буквы, а ее *обозначение* («Ом») — с прописной. Это общее правило — все обозначения единиц измерения, которые образованы от фамилий ученых, пишутся с прописной буквы: Дж (джоуль), Вт (ватт), В (вольт), А (ампер). В то же время обозначения единиц измерения, которые не образованы от имен собственных, а являются обычными словами, пишутся со строчной буквы: с (секунды), м (метры).

Сопротивление проводника зависит от его геометрических размеров — оно увеличивается пропорционально длине и уменьшается пропорционально площади сечения:  $R = \rho \cdot L/S$ . Большое практическое значение имеет коэффициент пропорциональности  $\rho$  — так называемое *удельное сопротивление* материала проводника. При определенной температуре (обычно берется  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) эта величина почти постоянна для каждого материала. «Почти» я тут написал потому, что на самом деле эта величина сильно зависит от химической чистоты и даже от способа изготовления материала проводника (например, формировался ли проводник штамповкой, про-