

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

ТОК, НАПРЯЖЕНИЕ И МОЩНОСТЬ

ПРАВИЛЬНОЕ ПИТАНИЕ — ЗАЛОГ ЗДОРОВЬЯ

ОТКУДА ВЕРУТСЯ ЦИФРЫ

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ — ОСНОВА
СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ПЕРСОНАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР ВМЕСТО ПАНЕЛИ

ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НА МИКРОКОНТРОллЕРАХ

Юрий Ревич

ghy

Юрий Ревич

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2007

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-04
P32

Ревич Ю. В.

P32 Занимательная микроэлектроника. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 592 с.: ил.

ISBN 978-5-9775-0080-7

Книга на практических примерах рассказывает о том, как проектировать, отлаживать и изготавливать современные электронные устройства в домашних условиях. Теоретические основы, физические принципы работы электронных схем и различных типов радиоэлектронных компонентов иллюстрируются практическими примерами в виде законченных радиолюбительских конструкций и дополняются советами по технологии изготовления любительской аппаратуры. На доступном уровне излагаются теоретические основы цифровой техники — математическая логика и различные системы счисления. Вторая часть книги полностью посвящена программированию микроконтроллеров, как основы современной электроники. Особое внимание уделяется обмену данными микроэлектронных устройств с персональным компьютером, приводятся примеры программ на Delphi.

Для широкого круга радиолюбителей

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-04

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Шишигин</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Леонид Кочин</i>
Компьютерная верстка	<i>Натальи Караваевой</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн обложки	<i>Игоря Цырульникова</i>
Оформление обложки	<i>Инны Тачиной</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 30.03.07.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 47,73.

Тираж 3000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 194354, Санкт-Петербург, ул. Есенина, 5Б.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.02.953.Д.006421.11.04 от 11.11.2004 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

Оглавление

К читателю	1
Что нового?	3
Как читать?	4
Как разрабатывать схемы?	6
ЧАСТЬ I. ЭЛЕКТРОНИКА БЕЗ ПРОГРАММИРОВАНИЯ.....	9
Глава 1. Основные физические законы в микроэлектронике	11
Чем отличается ток от напряжения?	11
Сопротивление	13
Схема с двумя резисторами.....	15
Источники напряжения и тока	18
Параллельное и последовательное соединение резисторов и расчет схем	19
Вольтметр и амперметр в измеряемой цепи.....	22
Глава 2. Переменный ток, мощность и конденсаторы.....	25
Переменное напряжение.....	26
Мощность.....	30
Что показывает вольтметр в цепи переменного тока	32
Конденсаторы	35
Параллельное и последовательное включение конденсаторов.....	41
Конденсаторы в цепи переменного тока.....	41
Дифференцирующие и интегрирующие цепи	43
Сигналы.....	45
Переменный ток, как основа цивилизации	46
Глава 3. Основные дискретные компоненты.....	48
Диоды	49
Транзисторы	51
Ключевой режим работы биполярного транзистора	53

Усилительный режим работы биполярного транзистора.....	56
Схема с общим эмиттером.....	57
Схема с общим коллектором.....	58
Стандартный усилительный каскад на транзисторе.....	60
Дифференциальный каскад.....	63
Полевые транзисторы.....	64
Стабилитроны.....	66
Оптоэлектроника и светодиоды.....	69
Оптоэлектроника.....	69
Светодиоды.....	70
Светодиодные индикаторы.....	72
ЖК-дисплеи.....	73
Электромагнитные реле.....	76
Глава 4. Правильное питание — залог здоровья.....	81
Трансформаторы.....	83
Простейший нестабилизированный источник питания.....	85
Стабилизаторы.....	89
Интегральные стабилизаторы.....	92
Импульсные источники питания.....	94
Самодельный импульсный преобразователь.....	95
Как правильно питаться.....	97
Глава 5. Изготовление радиолюбительских конструкций.....	100
Платы и пайка.....	101
Изготовление плат.....	102
Пайка.....	105
Макетные платы.....	107
Немного о резисторах и конденсаторах.....	108
Корпуса.....	109
Расчет радиаторов.....	111
Помехи.....	115
Глава 6. Аналоговые микросхемы.....	117
Слайсы, которые стали чипами.....	117
Эксплуатация микросхем.....	122
Операционные усилители.....	124
Опасные связи.....	125
Базовые схемы усилителей на ОУ.....	129
Дифференциальные усилители.....	132
Другие распространенные схемы на ОУ.....	135

Регулятор оборотов вентилятора	137
Терморегулятор для воды.....	140
Звуковые усилители	145
О децибелах.....	147
Мощный УМЗЧ.....	148
Микроусилитель мощности.....	151
Глава 7. На пороге цифрового века.....	154
Булева алгебра	155
Основные операции алгебры Буля.....	157
Булева алгебра на выключателях и реле	160
Как мы считаем	163
Позиционные и непозиционные системы счисления.....	165
Десятичная и другие системы счисления	167
Двоичная система	168
Шестнадцатеричная система	170
Перевод из одной системы счисления в другую	170
Байты.....	172
Запись чисел в различных форматах	174
Формат BCD.....	175
Двоичная арифметика.....	176
Отрицательные числа	177
Вычитание	177
Глава 8. Математическая электроника или игра в квадратики.....	180
Базовый логический элемент КМОП	181
Основные логические элементы	185
Обработка двоичных сигналов с помощью логических элементов	187
Исключающее ИЛИ	189
Использование статической логики	191
Коды и шифры	192
Управление цифровыми индикаторами	193
Двоичный/десятичный дешифратор.....	196
Мультиплексоры/ демультиплексоры и ключи.....	198
Глава 9. Применение цифровых микросхем малой степени интеграции	200
Релаксационные схемы.....	200
Генераторы прямоугольных колебаний	201
Кварцевые резонаторы.....	203

Формирователи импульсов	205
Одновибраторы	208
Триггеры	210
D-триггеры	214
Счетный триггер	215
Регистры	216
Счетчики	217
Глава 10. Откуда берутся цифры.....	220
Оцифровка	221
ЦАП	224
АЦП	228
АЦП параллельного действия	228
АЦП последовательного приближения	228
Интегрирующие АЦП	230
Конструируем цифровой термометр	236
АЦП 572ПВ2 и ПВ5	236
Практическая схема термометра.....	240
ЧАСТЬ II. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ.....	247
Глава 11. Анатомия микроконтроллера.....	249
Как работает микропроцессор	253
Лечение амнезии	260
Изобретаем простейшую ROM	261
Общее устройство памяти	263
RAM.....	265
EPROM, EEPROM и Flash	268
Глава 12. Знакомство с микроконтроллером.....	274
Classic, Mega и Tunny.....	275
Структура МК AVR	277
Параллельные порты ввода/вывода	279
Прерывания	281
Таймеры-счетчики	283
Глава 13. Персональный компьютер вместо паяльника.....	285
Как программируются микроконтроллеры	286
Программаторы.....	287
С или ассемблер?.....	292

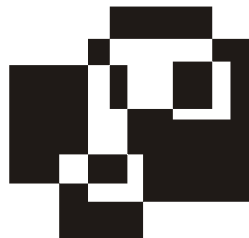
Обустройство ассемблера.....	296
Структура программы AVR	299
Обработка прерываний	301
Процедура <i>RESET</i>	304
Определения переменных, констант и подключение внешних файлов.....	305
Система команд AVR.....	308
Формат команды.....	308
Выходные файлы.....	309
Команды перехода (передачи управления).....	312
Арифметика и логика в интерпретации AVR	318
Команды переноса данных	322
О Fuse-битах	326
Глава 14. Проба пера: настольные часы.....	329
Выбор микроконтроллера и общее построение схемы	331
Схема	334
Программа.....	338
Детали и конструкция.....	342
Глава 15. Вычисления в МК и использование АЦП.....	345
Процедуры умножения для многобайтовых чисел.....	346
Процедуры деления для многобайтовых чисел	349
Операции с числами в формате BCD	353
Использование встроенного АЦП	357
Измеритель температуры и давления на AVR	361
Схема	363
Программа	365
Калибровка	368
Хранение констант в EEPROM.....	370
Сохранность данных в EEPROM	371
Запись и чтение EEPROM.....	373
Первичная запись констант в EEPROM	374
Глава 16. Некоторые последовательные интерфейсы МК.....	379
UART и RS-232.....	380
Прием и передача данных через UART	385
Отладка программ с помощью UART	388
Запись констант через UART.....	389
Последовательный интерфейс I ² C	393
Программная эмуляция протокола I ² C.....	397

Запись данных во внешнюю flash-память.....	399
Чтение данных из памяти через UART.....	406
Часы с интерфейсом I ² C.....	409
Глава 17. «Зеленые» микросхемы.....	424
О режимах энергосбережения AVR.....	425
Измеритель давления и температуры в автономном режиме.....	427
Использование режима энергосбережения.....	429
Доработка программы.....	431
Использование сторожевого таймера.....	435
Глава 18. Персональный компьютер и системы на МК.....	438
Соединение ПК и МК.....	439
Преобразователи уровней UART в уровни RS-232.....	442
Подключение через USB.....	445
Программа COM2000.....	449
Работа с COM-портом в Delphi.....	452
Работа через функции Win32 API.....	453
Использование драйвера AsyncFree.....	459
Глава 19. Практические схемы на AVR.....	465
Заставить камни заговорить.....	465
Программа для вывода звука.....	470
Аналоговая индикация.....	473
Подстройка внешних часов.....	478
Измерение частоты.....	482
Объединение систем на МК.....	487
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	491
Приложение 1. Принятые условные обозначения.....	493
Физические величины и их единицы измерения по умолчанию.....	493
Приставки и множители для образования десятичных кратных и дольных единиц.....	494
Некоторые буквенные обозначения в электрических схемах.....	494
Некоторые символические обозначения в электрических схемах.....	495
Символические обозначения мощности резисторов на схемах.....	497
Приложение 2. Стандартные обозначения и размеры некоторых гальванических элементов.....	498

Приложение 3. Справочные данные некоторых компонентов.....	499
Соответствие наименований зарубежных и отечественных микросхем КМОП.....	501
Диоды	502
КД521	502
1Nxxxx	503
КД 202.....	503
КЦ 407А.....	504
КУ202Н.....	505
Транзисторы	506
КТ315, КТ361	506
КТ3102, КТ3107.....	507
КТ814, КТ815, КТ816, КТ817.....	508
КТ972, КТ973	509
КТ818, КТ819	510
КТ829	511
BDW93, BDW94.....	512
КП303.....	513
Электронные реле и оптроны.....	514
АОД130.....	514
АОР124Б.....	515
КР293КП1 (5П14)	516
РФ240D25	516
Микросхемы	517
1019ЕМ1	517
7805, 7809, 7812, 7815, 7905, 7909, 7912, 7915	518
78L05, 78L09, 78L12, 78L15, 79L05, 79L09, 79L12, 79L15.....	519
LM311 (521СА3, 554СА3)	520
μ А741 (140УД7).....	521
μ А747 (140УД20).....	522
МАХ478.....	522
ТДА3020.....	523
АТ90S2313, АТ90S8515, АТ90S8535	524
Основные электрические параметры	525
Приложение 4. Базовые команды Atmel AVR.....	526
Арифметические и логические команды	527
Команды операций с битами.....	528
Команды сравнения.....	529
Команды передачи управления.....	530

Команды безусловного перехода и вызова подпрограмм	530
Команды условного перехода	531
Команды переноса данных.....	532
Команды управления системой	534
Приложение 5. Тексты программ	535
Программа для часов	535
Программа измерителя температуры и давления	544
Процедуры обмена по интерфейсу Г ² С.....	555
Приложение 6. Словарь часто встречающихся терминов.....	562
Литература	569
Предметный указатель	571

Глава 1



Основные физические законы в микроэлектронике

— Уйди-уйди! — закричал вампир. —
Мы так не договаривались. Я боюсь
электричества.

Кир Булычев «Вампир Полумракс»

В наше время нередко можно встретить «эксперта» по английской культуре, не знающего английского языка, или «программиста», не разбирающегося в математической логике. Не будем им уподобляться, тем более что практическая электроника совсем не требует знаний на уровне физико-математического факультета МГУ. Вполне работоспособные схемы можно создавать и проектировать, обладая лишь багажом сведений в пределах 8-го класса средней школы, но уж в базовых понятиях из области электричества желательно ориентироваться как можно свободнее. Мы и начнем с того, что проясним их для себя раз и навсегда.

Чем отличается ток от напряжения?

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 выражениях вроде «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, т. к. ток в вольтах не измеряется. Самое правильное будет сказать — «источник питания постоянного напряжения 12 вольт», а написать можно и «источник питания =12В» где символ «= \Rightarrow » 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 (забубривать их — очень полезное занятие!). Итак, *ток*, точнее,

его величина, *есть количество заряда, протекающее через сечение проводника за единицу времени: $I = Q/t$* . Единица измерения тока — *ампер*, а ее размерность — кулоны в секунду (здесь и далее, кроме оговоренных случаев, мы будем употреблять систему единиц СИ). Знание сего факта пригодится нам позднее. Куда более запутанно выглядит определение напряжения, как *разности 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*.

В этой главе мы будем говорить о постоянном токе и напряжении. Все это наглядно можно представить себе, сравнив проводник с трубой, по которой течет вода. При таком сравнении величина тока есть количество (расход) протекающей воды за секунду. Это довольно точная аналогия, роль молекул воды играют бегущие по проводнику электроны. Тогда напряжение представит, как разность давлений на входе и выходе трубы, за счет которой поток приобретает способность к движению.

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 совсем точно), с нулевым потенциалом, 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 в заголовке: чем же отличается ток от напряжения? Правильный ответ будет звучать так: ток — это количество электричества, а напряжение — мера его потенциальной энергии, способности к движению.

Напряжение и ток обычно связаны между собой. Слово «обычно» я употребил потому, что в некоторых случаях — для источников напряжения или тока, о которых мы поговорим в этой главе далее — от этой связи стараются избавиться, хотя полностью это сделать никогда не удастся. Если вернуться к аналогии с трубой, то легко представить, как при возрастании давления (напряжения) увеличивается количество протекающей жидкости (ток), т. е. зависимость тока от напряжения довольно наглядна. Сложнее уяснить обратную зависимость: как ток влияет на напряжение. Для этого нужно сначала понять, что такое *сопротивление*.

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.

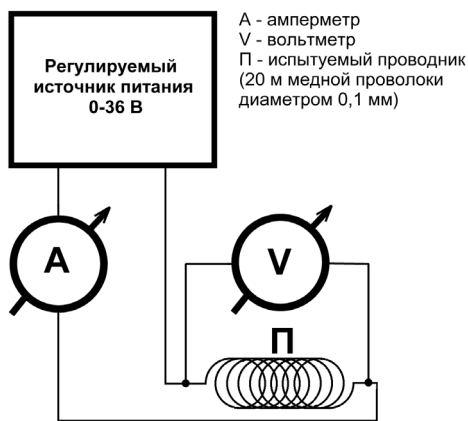


Рис. 1.1. Схема эксперимента по проверке закона Ома

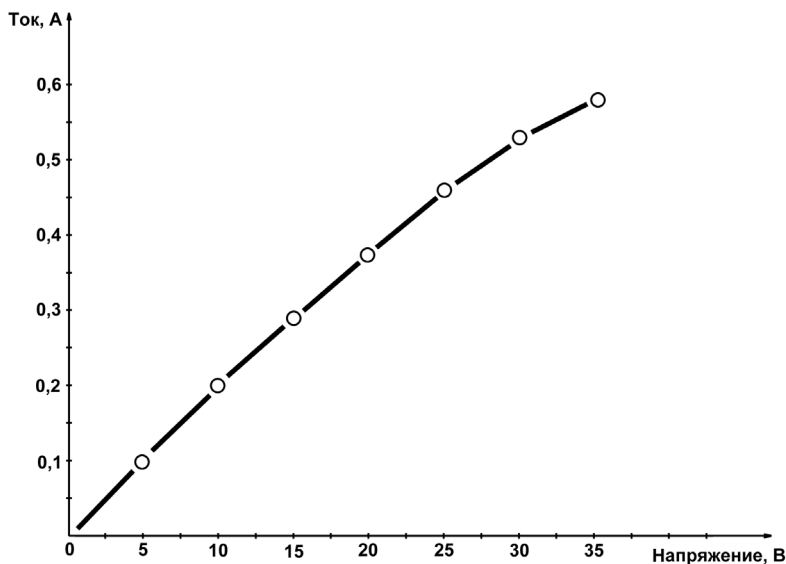


Рис. 1.2. Примерные результаты проверки закона Ома

Показанные на графике результаты весьма приблизительны, т. к. вид кривой будет сильно зависеть от того, как именно выполнен проводник (R_1 на рис. 1.2): намотан ли он плотно или редко на толстый массивный каркас или на тонкий, а также от температуры в комнате, сквозняка и еще от множества других причин. Именно такое непостоянство и смущало физиков — меняется не только ход кривой (т. е. ток в общем случае непропорционален напряжению), но вид и форма этой зависимости 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 происходят от того, что сама величина сопротивления R зависит от материала проводника 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% на каждый градус). А вот сама величина этого нагрева зависит от всего, что угодно: намотайте провод поплотнее и заверните его в асбест, он будет нагреваться сильнее, а размотайте его и поместите на сквозняк — нагрев резко уменьшится.

В ознаменование заслуг Георга Ома единица измерения сопротивления так и называется — *ом*. Согласно формуле закона Ома, приведенной в предыдущем абзаце, *1 Ом есть сопротивление такого проводника, через который течет ток в 1 А при напряжении на его концах, равном 1 В*. Обратная сопротивлению величина называется *проводимостью* и измеряется в *сименсах*, названных так в честь другого ученого: 1 Сименс = 1/Ом. В электронике почти всегда оперируют величиной сопротивления, так что сименсы мы в основном оставим для физиков, хотя иногда прибегать к ним приходится.

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 ρ — т. н. удельное сопротивление материала проводника. При определенной температуре (обычно берется 20 °С) 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. Поэтому для проводников употребляют очень чистые металлы, скажем, обычный медный провод изготавливают из меди с количеством примесей не более 0,1% (как говорят, с чистотой в «три девятки»). Это позволяет уменьшить сопротивление такого провода и избежать лишних потерь на его нагрев.

Удельное сопротивление проводника, по определению, есть сопротивление (Ом) проводника единичной площади (м^2) и длины (м). Если подставить эти величины в предыдущую формулу, вы получите размерность для удельного сопротивления $\text{Ом}\cdot\text{м}^2/\text{м}$ или просто $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Практически в таких единицах измерять удельное сопротивление страшно неудобно, т. к. для металлов величина получается крайне маленькой — представляете сопротивление куба меди с ребром в 1 м?! На практике часто употребляют единицу в 100 раз больше: $\text{Ом}\cdot\text{см}$. Эта величина часто приводится в справочниках, но и она не слишком удобна для практических расчетов. Так как диаметр проводников измеряют обычно в миллиметрах (а сечение, соответственно, в квадратных миллиметрах), то на практике наиболее удобна старинная внесистемная единица $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, которая равна сопротивлению проводника сечением в 1 квадратный миллиметр и длиной 1 метр. Для того чтобы выразить «официальный» $\text{Ом}\cdot\text{м}$ в этих единицах, нужно умножить его величину на 10^6 , а для $\text{Ом}\cdot\text{см}$ — на 10^4 . Посмотрев в справочнике величину удельного сопротивления меди ($0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ при 20°C), мы легко можем вычислить, что сопротивление проводника с параметрами, приведенными на рис. 1.1, составляет около 45 Ом (проверьте!).

ЗАМЕТКИ НА ПОЛЯХ

Надо сказать, что человечество весьма преуспело в изготовлении специальных материалов, имеющих коэффициент удельного сопротивления, мало зависящий от температуры. Это, прежде всего, специальные сплавы, константан и манганин, температурный коэффициент сопротивления (ТКС) которых в несколько сотен раз меньше, чем у чистых металлов. А для обычных стандартных углеродистых или металлопленочных резисторов ТКС составляет приблизительно 0,1% на градус или меньше, т. е. примерно в 4 раза лучше, чем у меди. Есть и специальные прецизионные резисторы (среди отечественных это, например, С2-14, С2-29В, С5-61, проволочные С5-54В и др.), у которых этот коэффициент значительно меньше. Есть и другие материалы, у которых температурный коэффициент, наоборот, весьма велик (несколько процентов на градус, и при этом, в отличие от металлов, отрицателен) — из них делают т. н. термисторы, которые применяют в качестве чувствительных датчиков температуры. Для точного измерения температуры тем не менее используют чистые металлы — чаще всего платину и медь.

Схема с двумя резисторами

Познакомившись с понятием сопротивления и его особенностями, вспомним, для чего мы все это делали. Ах, да, мы же хотели понять, как практически представить зависимость напряжения от тока! Но ведь мы пока не умеем произвольно изменять ток в проводнике, так? Напряжение изменять просто — нужно взять регулируемый источник питания, как это изображено

на рис. 1.1, или, на худой конец, набор батареек, при последовательном соединении которых (1, 2, 3 и более штук) мы получим некий набор напряжений. А вот источников тока (именно тока, а не напряжения) мы еще не имеем. Как же быть?

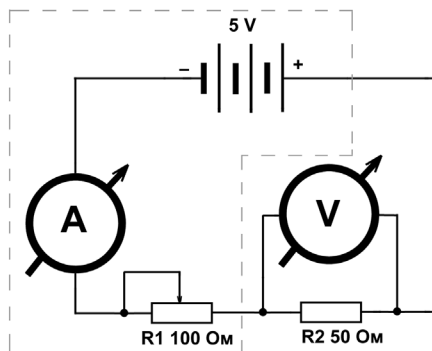


Рис. 1.3. Схема для изучения свойств цепи с двумя резисторами

Выход из этой ситуации показан на рис. 1.3 (заметьте, мы от схематического изображения проводника из длинной проволоки, имеющей некое сопротивление, перешли к стандартному обозначению резисторов, как это делается в настоящих электрических схемах, см. *Приложение 1*). Здесь нам уже не нужен регулируемый источник питания. Питается схема от батареи из трех гальванических элементов, например, типа D, соединенных последовательно (или одной типа 3336, см. *Приложение 2*). Каждый такой элемент (если он еще не был в эксплуатации) дает напряжение примерно 1,6 В, так что суммарное напряжение будет почти 5 В, как и указано на схеме (под нагрузкой и по мере истощения элементов напряжение немного упадет, но ошибка в данном случае не играет большой роли).

Как работает эта схема? Допустим, что движок переменного резистора R1 выведен в крайнее правое (по схеме) положение. Проследим путь тока от плюсового вывода батареи — амперметр, вывод движка резистора R1, крайний правый вывод R1, резистор R2, минусовой вывод батареи. Получается, что резистор R1 в схеме как бы не участвует, поскольку ток от плюсового вывода батареи сразу попадает на R2 (амперметр можно не принимать во внимание — далее мы узнаем, почему это так) и схема становится фактически такой же, как на рис. 1.1. Что покажут наши измерительные приборы? Вольтметр покажет напряжение батареи — 5 В, а показания амперметра легко вычислить по закону Ома: ток в цепи составит $5 \text{ В} / 50 \text{ Ом} = 0,1 \text{ А}$

или 100 мА (напомним еще раз, что это значение приблизительное, т. к. напряжение батареи несколько меньше 5 В).

Теперь поставим движок R1 в среднее положение. Ток в цепи теперь пойдет от плюса батареи через амперметр, вывод движка R1, половину резистора R1, резистор R2 и далее, как и раньше, вернется к минусу батареи. Как изменятся показания приборов? Раньше резистор R1 в деле не участвовал, а теперь участвует, хоть и половинкой. Соответственно, общее сопротивление цепи станет уже не 50 Ом (один резистор R2), а 50 (R2) + 50 (половинка R1), т. е. 100 Ом. Амперметр покажет уже не 100 мА, а $5 \text{ В} / 100 \text{ Ом} = 0,05 \text{ А}$ или 50 мА — в два раза меньше. А вот что покажет вольтметр? Так сразу и не скажешь, не правда ли? Придется считать, для этого рассмотрим отдельно участок цепи, состоящий из R2 с присоединенным к нему вольтметром. Очевидно, что току у нас деться некуда — все то количество заряда, которое вышло из плюсового вывода батареи, пройдет через амперметр, через половинку R1, через R2 и вернется обратно в батарею. Значит, и на этом отдельном участке, состоящем из одного R2, ток будет равен тому, что показывает амперметр, т. е. 50 мА. Получается, как будто резистор R2 подключен к источнику тока!

ЗАМЕЧАНИЕ

На самом деле это не совсем точно — часть тока, хотя и очень небольшая, все же пойдет через вольтметр, минуя R2. Но на практике, особенно для современных вольтметров, этим всегда пренебрегают (см. далее).

И это действительно так — источник напряжения с последовательно включенным резистором (в данном случае это половинка R1) представляет собой источник тока (хотя и плохой). Так каковы же будут показания вольтметра? Очень просто: из закона Ома следует, что $U = I \cdot R$, где R — сопротивление нужного нам участка цепи, т. е. R2, и в данном случае вольтметр покажет $0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ В}$. Эта величина называется *падением напряжения*, в данном случае — падением напряжения на резисторе R2. Легко догадаться, даже не подключая вольтметр, что падение напряжения на резисторе R1 будет равно тоже 2,5 В, причем его можно вычислить двумя путями: как разницу между 5 В от батареи и падением на R2 (2,5 В), или по закону Ома, аналогично расчету для R2.

ЗАМЕЧАНИЕ

И это не совсем точно — амперметр тоже имеет некоторое сопротивление и может быть представлен в виде еще одного последовательного резистора. Но, как и в случае вольтметра, этим на практике пренебрегают.

А что будет, если вывести движок переменника в крайнее левое положение? Я сразу приведу результат: амперметр покажет 33 мА, а вольтметр — 1,66 В. Пожалуйста, проверьте это самостоятельно! Если вы получите те же значения, то это будет означать, что вы усвоили закон Ома и теперь умеете отличать ток от напряжения.

Источники напряжения и тока

В схеме на рис. 1.3 мы можем выделить, как показано пунктиром, ее часть, включив туда батарейку и переменный резистор R1. Тогда этот резистор (вместе с сопротивлением амперметра, конечно) можно рассматривать, как *внутреннее сопротивление* источника электрической энергии, каковым выделенная часть схемы станет для нагрузки, роль которой будет играть R2. Любой источник, как легко догадаться, имеет свое внутреннее сопротивление (электронщики часто употребляют выражение «выходное сопротивление») — хотя бы потому, что у него внутри есть провода определенной толщины.

Но на самом деле не провода служат ограничивающим фактором. В *главе 2* мы узнаем, что такое мощность в строгом значении этого понятия, а пока, опираясь на интуицию, можно сообразить: чем мощнее источник, тем меньше у него должно быть свое внутреннее сопротивление, иначе все напряжение «сядет» на этом сопротивлении, и на долю нагрузки ничего не достанется. На практике так и происходит. Если вы попытаетесь запустить от набора батареек типа АА какой-нибудь энергоемкий прибор, питающийся от источника с низким напряжением (вроде настольного сканера или ноутбука), то устройство, конечно, не заработает, хотя формально напряжения должно хватать, — напряжение уменьшится почти до нуля. А вот от автомобильного аккумулятора, который гораздо мощнее, все получится, как надо.

Такой источник, у которого внутреннее сопротивление мало по отношению к нагрузке, называют еще *идеальным источником напряжения* (физики предпочитают название *идеальный источник ЭДС*, т. е. «электродвижущей силы»), на практике, однако, это абстрактное понятие встречается реже, чем менее строгое, но всем понятное «напряжение»). К ним относятся, в первую очередь, все источники питания: от батареек до промышленной сети.

Наоборот, *идеальный источник тока*, как нетрудно догадаться, обязан обладать бесконечным внутренним сопротивлением — только тогда ток в цепи совсем не будет зависеть от нагрузки. Понять, как источник реального тока (не бесконечно малого) может обладать бесконечным выходным сопротивлением, довольно трудно, и в быту таких источников вы не встретите. Однако

уже обычный резистор, включенный последовательно с источником напряжения (не тока!), как R_1 на рис. 1.3, при условии, что сопротивление нагрузки мало ($R_2 \ll R_1$), может служить хорошей моделью источника тока. Еще ближе к идеалу транзисторы в определенном включении, и мы с этим разберемся позднее.

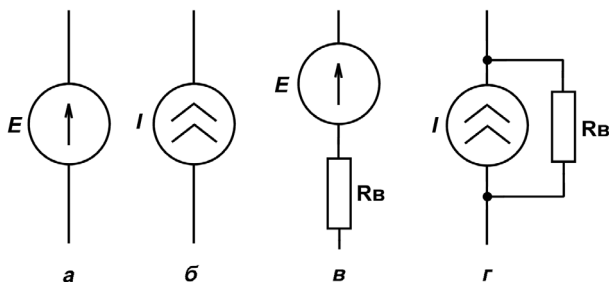


Рис. 1.4. Источники тока и напряжения:
 а — обозначение идеального источника напряжения;
 б — обозначение идеального источника тока;
 в — эквивалентная схема реального источника напряжения;
 г — эквивалентная схема реального источника тока

Источники напряжения и тока обозначаются на схемах так, как показано на рис. 1.4, а и б. Не перепутайте, логики в этих обозначениях немного, но так уж принято. А эквивалентные схемы (их еще называют *схемами замещения*) реальных источников приведены на рис. 1.4, в и г, где $R_{в}$ обозначает внутреннее сопротивление источника. Как можно использовать эти эквивалентные схемы при анализе реальных цепей? Для этого нужно окончательно разобраться, как рассчитываются схемы с параллельным и последовательным включением резисторов.

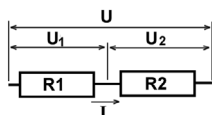
Параллельное и последовательное соединение резисторов и расчет схем

Схемы постоянного тока любой степени сложности всегда можно представить как совокупность резисторов и идеальных источников напряжения и тока. Для их расчета достаточно знать два очень простых закона, названных по имени физика XIX столетия Густава Роберта Кирхгофа (1824—1887).

Первый закон Кирхгофа формулируется так: *алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю*. Или еще проще: *сумма токов, направленных к данному узлу, равна сумме токов, направленных от него*.

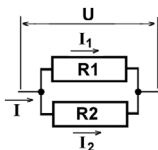
По сути он представляет одну из форм физических законов сохранения — ведь заряды не могут возникнуть из ничего, соответственно, сколько прибыло зарядов в некую точку, столько из нее обязано уйти.

Второй закон Кирхгофа гласит: *алгебраическая сумма падений напряжения вдоль любого замкнутого контура электрической цепи равна нулю*. Его легко проиллюстрировать на примере нашей схемы рис. 1.3 — там сумма падений напряжений на всех резисторах (включая внутреннее сопротивление батарейки, сопротивление амперметра, которым мы пренебрегали, и т. д.) равна напряжению батарейки. Иначе и быть не может — куда оно, напряжение батарейки, тогда денется?



Последовательное соединение резисторов

$$R = R_1 + R_2$$



Параллельное соединение резисторов

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2$$

Рис. 1.5. Последовательное и параллельное соединение резисторов

Из законов Кирхгофа вытекают очень часто применяющиеся на практике правила последовательного и параллельного соединения резисторов: при последовательном соединении складываются сопротивления резисторов, а при параллельном складываются их проводимости, которые по определению, данному ранее, есть величины, обратные сопротивлению (рис. 1.5). Понять, почему правила именно таковы, можно, если рассмотреть течение токов в обоих случаях.

- При последовательном соединении ток I через резисторы один и тот же, поэтому падения напряжения на них складываются ($U = U_1 + U_2$), что равносильно сложению сопротивлений.
- При параллельном соединении, наоборот, равны падения напряжений U , а складывать приходится токи ($I = I_1 + I_2$), что равносильно сложению