

26 Электрический ток

До 1800 г. развитие электротехники основывалось главным образом на получении с помощью трения статического заряда. В предшествующее столетие были построены машины, позволяющие достигать таким способом довольно высоких потенциалов; одна из них показана на рис. 26.1. С помощью этих машин удавалось получать довольно сильные разряды, но практического значения они не имели.

Гораздо большее впечатление производили природные проявления электричества: молнии или огни Св. Эльма – свечение на концах рей и мачт кораблей во время бури. Однако электрическая природа этих явлений стала ясна только в XVIII в. К примеру, лишь в 1752 г. Франклин в своем знаменитом опыте с воздушным змеем продемонстрировал, что молния представляет собой электрический разряд – гигантскую электрическую искру.

Наконец, в 1800 г. произошло событие огромного практического значения. Алессандро Вольта (1745–1827) изобрел электрическую батарею и впервые получил с ее помощью устойчивый поток электрического заряда, т. е. постоянный электрический ток. Это открытие знаменовало начало новой эпохи, полностью преобразившей нашу цивилизацию: вся современная электротехника основана на использовании электрического тока.

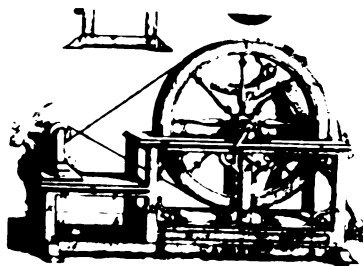


Рис. 26.1. Старинный электро-статический генератор.

26.1. Электрическая батарея

Интересен путь, приведший к созданию первой электрической батареи. С этим важным открытием связан знаменитый научный спор между Вольтой и Луиджи Гальвани (1737–1798), в который были вовлечены и многие другие представители научного мира.

В 1780-х годах Гальвани, профессор Болонского университета (видимо, старейшего из существующих поныне), выполнил большую серию опытов, изучая сокращение мышц лягушки под действием электричества, вырабатываемого электрической машиной. В ходе этих опытов Гальвани к своему удивлению обнаружил, что сокращения мышц можно добиться и другими способами. На медном крючке он подвешивал лягушку за позвоночник к железной решетке балкона, и, когда лапка тоже касалась решетки, она сокращалась. Дальнейшие эксперименты подтвердили, что этот странный, но важный эффект наблюдается и с другими парами металлов.

В чем же причина этого необыкновенного явления? Гальвани считал, что источник электрических зарядов находится в самих мышцах или нервах лягушки, а металл служит лишь проводником заряда тела. В работе, опубликованной в 1791 г., он ввел понятие «животное электричество». Многие, в том числе и Гальвани, задавались вопросом: не открыл ли он ту самую «жизненную силу», которая давно занимала умы ученых?

Вольта, работавший в Павийском университете (200 км от Болоньи), поначалу скептически отнесся к результатам Гальвани. Однако, побуждаемый коллегами, он вскоре повторил опыты Гальвани и пошел еще дальше. Но Вольта сомневался в теории «животного электричества»: по его мнению, источник электричества не находился в организме животного, а возникал при *контакте между двумя металлами*. Вольта опубликовал свои предположения и вскоре имел уже много последователей, хотя немало ученых оставались по-прежнему на стороне Гальвани.

Талант теоретика сочетался у Вольты с искусством экспериментатора. Он вскоре понял, что для получения нужного результата цепь должна включать влажный проводник типа мышц лягушки или влажный контакт двух разнородных металлов. Понял он также, что сокращение лягушечьей лапки служит чувствительным прибором для обнаружения того, что он называл «электрическим напряжением» или «электродвижущей силой» (мы теперь называем это потенциалом), — намного более чувствительным, чем самые совершенные из разработанных им и другими учеными электрометров. И самое важное, Вольта рассудил, что решающий ответ Гальвани он сможет дать лишь в том случае, если ему удастся заменить лягушечью лапку иным, неорганическим детектором.

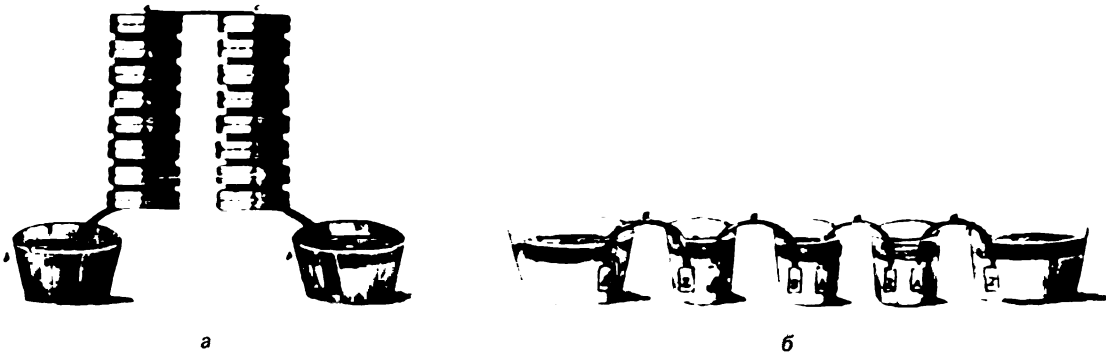


Рис. 26.2. Две конструкции батарей Вольты: *а* – вольтов столб; *б* – цепочка чашек. *Z* обозначает цинк, *A* – серебро (от лат. *argentum*). Воспроизводится по оригинальной публикации Вольты. (Библиотека Бэнди, Норуолк, шт. Коннектикут.)

Другими словами, для доказательства того, что причиной сокращения лапки является именно контакт двух разнородных металлов, ему следовало бы подключить их к электрометру и зарегистрировать отклонение листочков, указывающее на наличие разности потенциалов. Это оказалось для Вольты сложной задачей, так как самые чувствительные его электрометры немногочисленно уступали лягушечьей лапке¹⁾. Но в конечном счете успешный эксперимент доказал справедливость теории Вольты.

Исследования Вольты показали, что одни сочетания металлов дают больший эффект, нежели другие, и на основании своих измерений Вольта расположил металлы в порядке их «эффективности». (Химики по сей день используют этот «электрохимический ряд».) Он обнаружил также, что вместо одного из металлов можно использовать уголь.

Затем Вольте удалось постигнуть то, что стало его главным вкладом в науку. Он проложил между серебряным и цинковым дисками кусочек бумаги или ткани, пропитанный раствором соли или разбавленной кислотой, а затем собрал из таких кружочков столбик, укладывая их один на другой, как показано на рис. 26.2. Такой «столб» (или «батарея») оказался источником гораздо большей разности потенциалов, чем одна пара кружочков. При сближении проводников, подключенных к концам столба, между ними проскакивала искра. Вольта сконструировал и построил первую электрическую батарею. На рис. 26.2 показана и другая конструкция, известная под названием «цепочка чашек». Свое замечательное открытие Вольта опубликовал в 1800 г.

Разность потенциалов, создаваемая вольтовым стол-

¹⁾ Чувствительность лучшего электрометра Вольты составляла примерно 40 В на градус (угла расхождения листочков). Тем не менее, ему в конце концов удалось оценить разность потенциалов, возникающую при контакте разнородных металлов: для пары серебро – цинк он получил значение 0,7 В, что очень близко к современному значению 0,78 В.

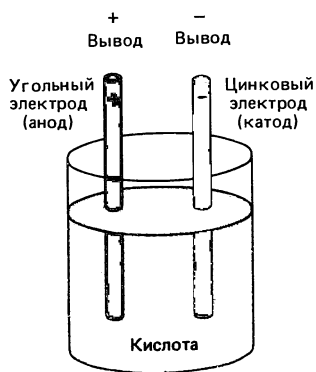


Рис. 26.3. Простейший гальванический элемент.

бом, была все же слабой по сравнению с той, какую создавали лучшие электростатические машины того времени, хотя такой столб позволял получать довольно значительный заряд. (Электростатические машины создают высокий потенциал, но небольшой заряд.) Однако у вольтова столба было и огромное достоинство: он оказался способен к «самообновлению» и мог обеспечивать поток электрического заряда в течение довольно длительного времени. А вскоре были сконструированы и более мощные батареи.

В конце концов стало ясно, что в изобретенной Вольтой электрической батарее электричество возникает благодаря превращению химической энергии в электрическую. В наши дни выпускается множество электрических элементов и батарей различных типов — от батареек для карманного фонарика (которые называют также сухими элементами) до автомобильных аккумуляторных батарей. Простейшая батарея (гальванический элемент) состоит из двух так называемых *электродов* — стержней или пластин из разнородных металлов (одним из электродов может служить уголь). Электроды погружены в *электролит*, например разбавленную кислоту. В сухом элементе электроды представляет собой желеобразную массу. Так выглядит элемент, а несколько элементов, соединенных между собой, образуют электрическую батарею. Химические реакции, происходящие в большинстве элементов, довольно сложны; описание их деталей можно найти в учебниках химии. Здесь же мы рассмотрим работу самого простого элемента, интересуясь физической стороной дела.


В простейшем гальваническом элементе (рис. 26.3) в качестве электролита используется разбавленная серная кислота. Одним из электродов служит уголь, другим — цинк. Часть электрода, не погруженная в электролит, служит *клеммой*; к ней подключаются проводники, соединяющие элемент и схемы. Кислота постепенно растворяет цинковый электрод. Атомы переходят в раствор в виде положительных ионов, оставляя по два электрона на электроде. Таким образом, цинковый электрод становится отрицательно заряженным. По мере того как цинк переходит в раствор, электролит приобретает положительный заряд. Вследствие этого, а также в результате других химических реакций электроны покидают угольный электрод, который при этом приобретает положительный заряд. Положительный электрод называют *анодом*, отрицательный — *катодом*. Поскольку у электродов противоположные по знаку заряды, между клеммами возникает разность потенциалов. В элементе с разомкнутыми клеммами растворяется лишь незначительное количество цинка; по мере того как цинковый электрод накапливает отрицательный заряд, образующиеся положительные ионы цинка притягиваются обратно к электро-

ду. Таким образом, между клеммами поддерживается определенная разность потенциалов, или напряжение. Если же заряд перемещается между клеммами (например, по проводнику или через электрическую лампу), то растворение цинка усилится. Угольный электрод также испытывает разрушение. Спустя некоторое время тот или другой электрод полностью израсходуется и элемент «садится».

Напряжение между клеммами батареи зависит от вещества, из которого изготовлены электроды, от их способности переходить в раствор или отдавать электроны. Разность потенциалов на клеммах батареи при разомкнутой внешней цепи называется **электродвижущей силой (ЭДС)**; электродвижущую силу обозначают \mathcal{E} (не следует путать с напряженностью поля E). Обычно ЭДС гальванического элемента или аккумулятора составляет 1,0–2,0 В. Когда заряд поступает от батареи во внешнюю цепь, напряжение на клеммах оказывается ниже ЭДС из-за «внутреннего сопротивления» (мы обсудим это в разд. 27.2). При *последовательном соединении* двух или более элементов (когда плюсовую клемму одного элемента соединяют с минусовой клеммой следующего и т. д.) их ЭДС складывается. Так, ЭДС двух элементов для карманного фонарика, соединенных последовательно, равна 3,0 В, а шесть соединенных последовательно элементов в автомобильном аккумуляторе, каждый по 2,0 В, обеспечивают напряжение 12 В.

Любое устройство типа батареи, способное поддерживать определенную разность потенциалов и обеспечить поток электрического заряда во внешней цепи, называется *источником ЭДС*. Источниками ЭДС кроме элементов и батарей являются электрические генераторы, фотоэлементы, термопары и т. п. (о них мы еще поговорим позднее).

26.2. Электрический ток

Подсоединяя к клеммам батареи проводящий контур (например, провод), мы получаем электрическую *цепь* (рис. 26.4, а). На принципиальных схемах (рис. 26.4, б) батарея изображается символом , причем длинная

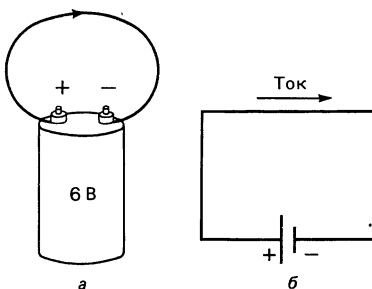


Рис. 26.4. а – простейшая электрическая цепь; б – схематическое представление той же цепи.

черточка соответствует положительной клемме, а короткая – отрицательной. По такой цепи заряд может перемещаться от одной клеммы батареи к другой; этот поток электрического заряда называется **электрическим током**.

Сила электрического тока в проводнике – это результирующее количество заряда, проходящее через данное сечение проводника в единицу времени. Таким образом, среднее значение силы электрического тока равно

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad (26.1)$$

где ΔQ – количество заряда, протекающее через поперечное сечение проводника за время Δt . Сила электрического тока измеряется в кулонах в секунду; эта единица носит название *ампер* (А) в честь французского физика Андре Ампера (1775–1836); $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$. Если сила тока не постоянна во времени, мгновенное значение можно определить как предел (26.1) при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (26.2)$$

В этой главе нас будет интересовать главным образом постоянный ток.

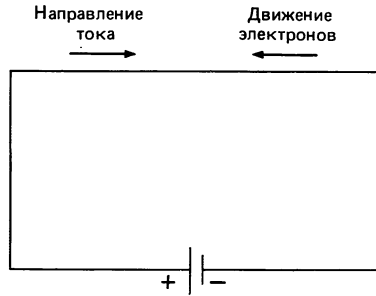
Пример 26.1. Сила постоянного тока в проводе, подключенном к батарее, составляет 2,5 А. Спустя 4,0 мин ток прекращается, так как проводник размыкается. Какой заряд прошел по проводу?

Решение. Согласно (26.1), полный заряд, прошедший по проводу за 4,0 мин (240 с), равен

$$\begin{aligned} \Delta Q &= I \Delta t \\ &= (2,5 \text{ Кл/с})(240 \text{ с}) = 600 \text{ Кл}. \end{aligned}$$

В гл. 22 уже говорилось, что проводники содержат много свободных электронов. Поэтому в проводнике, подключенном к клеммам батареи, как на рис. 26.4, в действительности перемещаются отрицательно заряженные электроны. В момент подключения проводника его свободные электроны притягиваются к положительной клемме батареи. В то же время электроны покидают отрицательную клемму батареи и поступают в проводник на другом конце. Появляется непрерывный поток электронов в проводнике, возникающий в тот момент, когда он подключается к *обеим* клеммам батареи. Но два века назад, когда только возникало соглашение о том, какие заряды считать положительными, а какие отрицательными, было сделано предположение, что по проводнику движутся положительные заряды. В действительности почти всегда движение положительного заряда в одном направлении оказывается в точности эквивалентным дви-

Рис. 26.5. Традиционно принятое направление тока от + к - эквивалентно току электронов от - к +.



жению отрицательного заряда в противоположном направлении (рис. 26.5) (см., однако, разд. 28.9). Сегодня мы по-прежнему придерживаемся этой исторической традиции, говоря о положительном направлении тока. Это соответствует также принятому определению электрического потенциала, основанному на использовании положительного пробного заряда. Под *направлением тока*, протекающего в цепи, мы, таким образом, понимаем то направление, в котором двигались бы положительные заряды. Когда же нас интересует направление движения электронов, мы будем специально оговаривать, что речь идет о потоке электронов. В жидкостях и газах способны перемещаться как отрицательные, так и положительные заряды (ионы). (Микроскопическая картина электрического тока обсуждается в разд. 26.5.)

26.3. Закон Ома. Электрическое сопротивление и резисторы

Электрический ток в цепи создается разностью потенциалов. Разность потенциалов можно получить, например, с помощью батареи. Немецкий физик Георг Симон Ом (1787–1854) экспериментально доказал, что сила электрического тока в металлическом проводнике прямо пропорциональна разности потенциалов на его концах:

$$I \sim V.$$

Это утверждение называют **законом Ома**. Если, например, подсоединить к батарее напряжением 6 В проводник, то через него потечет ток, сила которого будет в два раза больше, чем от батареи с напряжением 3 В.

Полезно сравнить электрический ток с потоком воды в реке или трубе. Если труба расположена почти горизонтально, скорость потока будет невелика. Но если один конец трубы окажется выше другого, скорость потока заметно увеличится. И чем больше разность уровней, тем больше скорость потока. В гл. 24 мы обратили внимание на аналогию между электрическим потенциалом и высотой скалы при рассмотрении электрического и гравитационного полей. Эта аналогия применима в данном случае к разности уровней потока. Подобно тому как уве-

личение перепада высот вызывает возрастание потока воды, чем больше разность потенциалов, или напряжение, тем больше сила электрического тока.

Сила тока в проводнике зависит не только от напряжения, но и от того сопротивления, которое проводник оказывает потоку электронов. Стенки трубы, берега реки и пороги создают сопротивление потоку воды. Точно так же и электроны тормозятся в результате взаимодействий с атомами проводника. Чем выше сопротивление, тем меньше сила тока при данном напряжении V . Таким образом, сопротивление определяется тем, что сила тока обратно пропорциональна ему. С учетом этого можно написать

$$I = \frac{V}{R}, \quad (26.3)$$

где R – **электрическое сопротивление** (или просто сопротивление) участка цепи, V – разность потенциалов на этом участке, а I – сила тока в цепи. Приведенные выражения часто записывают в виде $V = IR$ и называют законом Ома. Впрочем, это не закон, а скорее *определение сопротивления*. Обнаруженная Омом закономерность, строго говоря, состоит в утверждении, что сила тока в *металлическом проводнике* пропорциональна приложенному напряжению: $I \sim V$. Это утверждение несправедливо в общем случае, например, применительно к таким веществам, как полупроводники, электронные лампы, транзисторы и т.п. «Закон Ома» поэтому не относится к таким фундаментальным законам природы, как законы Ньютона, начала термодинамики или закон Кулона. Он лишь характеризует определенные материалы – металлические проводники. О материалах или схемах, для которых закон Ома не выполняется, говорят как о *неомических* или нелинейных. Определение электрического сопротивления

$$R = V/I$$

[формула (26.3)] применимо и к таким нелинейным случаям, но R будет не постоянным, а зависящим от приложенного напряжения. Закон Ома утверждает, что сопротивление R постоянно и не зависит от V для металлических проводников. Поскольку это утверждение не отражает фундаментальных свойств природы, его, вероятно, следовало бы называть не законом, а правилом или соотношением. Но выражение «закон Ома» настолько укоренилось, что мы не станем возражать против его употребления, а будем лишь помнить о его ограниченной применимости.

Единицей сопротивления служит *ом* (Ом); согласно (26.3), 1 Ом соответствует 1 В/А.

Пример 26.2. В этикетке на корпусе портативного магнитофона указано, что его следует подключать к источнику напряжения 6,0 В и что сила потребляемого тока составляет 300 мА. а) Чему равно полное сопротивление магнитофона? б) Как изменится сила потребляемого тока, если напряжение питания уменьшится до 5,0 В?

Решение. а) Согласно (26.3),

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6,0 \text{ В}}{0,30 \text{ А}} = 20 \text{ Ом}.$$

б) Если сопротивление не меняется, сила потребляемого тока составит $I = V/R = 5,0 \text{ В}/20 \text{ Ом} = 0,25 \text{ А}$, или на 50 мА меньше, чем прежде. В действительности сопротивление зависит от температуры (разд. 26.4), и полученный результат следует рассматривать как приближенный.

Все электрические приборы от нагревателей и электрических ламп до стереофонических усилителей оказывают сопротивление протекающему через них току. Соединительные провода обладают, как правило, очень низким сопротивлением. Во многих схемах, в частности в электронных приборах, для управления силой тока используют *резисторы*, которые могут иметь электрическое сопротивление от долей ома до 10^6 Ом (МОм). На рис. 26.6 показаны некоторые типы резисторов (табл. 26.1). Обычно резисторы бывают двух основных типов: проволочные (представляющие собой катушки тонкой проволоки) и непроволочные (обычно изготовленные на основе углеродной пленки).

На принципиальных схемах резисторы обозначаются символом $\sim\sim\sim$ ¹⁾. Проводники с пренебрежимо малым сопротивлением изображаются на схемах прямыми линиями.

Таблица 26.1. Цветная маркировка резисторов¹⁾

Цвет	Цифра	Множитель	Допуск
Черный	0	1	
Коричневый	1	10^1	
Красный	2	10^2	
Оранжевый	3	10^3	
Желтый	4	10^4	
Зеленый	5	10^5	
Синий	6	10^6	
Фиолетовый	7	10^7	
Серый	8	10^8	
Белый	9	10^9	
Золотой		10^{-1}	5%
Серебряный		10^{-2}	10%
Без окраски			20%

¹⁾ В отечественной практике в настоящее время не используется.— *Прим. ред.*

¹⁾ В отечественной литературе резисторы принято обозначать символом $\bullet\text{---}\square\text{---}\bullet$ символ $\sim\sim\sim$ оставлен специально для проволочных резисторов.— *Прим. перев.*

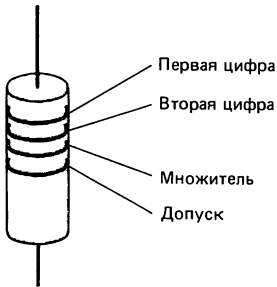


Рис. 26. 6. Сопротивление резистора указывается на корпусе цифрами или цветным кодом. Первые две полосы соответствуют двум значащим цифрам сопротивления, третья указывает множитель (число нулей), четвертая – допуск. Например, сопротивление резистора, имеющего красную, оранжевую, зеленую и серебряную полосы, равно 25 000 Ом (25 кОм) \pm 10%.

26.4. Удельное сопротивление и сверхпроводимость

На опыте установлено, что сопротивление R металлического проводника прямо пропорционально его длине L и обратно пропорционально площади его поперечного сечения A :

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (26.4)$$

где коэффициент ρ называется *удельным сопротивлением* и служит характеристикой вещества, из которого изготовлен проводник. Это соответствует здравому смыслу: сопротивление толстого провода должно быть меньше, чем тонкого, поскольку в толстом проводе электроны могут перемещаться по большей площади. И можно ожидать роста сопротивления с увеличением длины проводника, так как увеличивается количество препятствий на пути потока электронов.

Типичные значения ρ для разных материалов приведены в первом столбце табл. 26.2. (Реальные значения зависят от чистоты вещества, термической обработки, температуры и других факторов.) Самым низким удельным сопротивлением обладает серебро, которое оказывается, таким образом, наилучшим проводником; однако оно дорого. Немногом уступает серебру медь; ясно, почему провода чаще всего изготавливают из меди. Удельное сопротивление алюминия выше, чем у меди, однако

Таблица 26.2. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) (при 20 °С)

Вещество	Удельное сопротивление ρ , Ом·м	ТКС α , °С ⁻¹
Проводники		
Серебро	$1,59 \cdot 10^{-8}$	0,0061
Медь	$1,68 \cdot 10^{-8}$	0,0068
Алюминий	$2,65 \cdot 10^{-8}$	0,00429
Вольфрам	$5,6 \cdot 10^{-8}$	0,0045
Железо	$9,71 \cdot 10^{-8}$	0,00651
Платина	$10,6 \cdot 10^{-8}$	0,003927
Ртуть	$98 \cdot 10^{-8}$	0,0009
Нихром (сплав Ni, Fe, Cr)	$100 \cdot 10^{-8}$	0,0004
Полупроводники¹⁾		
Углерод (графит)	$(3-60) \cdot 10^{-5}$	-0,0005
Германий	$(1-500) \cdot 10^{-3}$	-0,05
Кремний	0,1-60	-0,07
Диэлектрики		
Стекло	10^9-10^{12}	
Резина твердая	$10^{13}-10^{15}$	

¹⁾ Реальные значения сильно зависят от наличия даже малого количества примесей.

он имеет гораздо меньшую плотность, и в некоторых случаях ему отдают предпочтение (например, в линиях электропередач), поскольку сопротивление проводов из алюминия той же массы оказывается меньше, чем у медных.

Часто пользуются величиной, обратной удельному сопротивлению:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (26.5)$$

называемой *удельной проводимостью*. Удельная проводимость измеряется в единицах $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

Пример 26.3. Вам надо подключить к стереоусилителю колонку, находящуюся на довольно большом расстоянии. Какой диаметр должен иметь медный провод длиной 20 м, чтобы его сопротивление не превышало 0,10 Ом?

Решение. Выразим A из (26.4) и воспользуемся табл. 26.2:

$$\begin{aligned} A &= \rho \frac{L}{R} = \frac{(1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м})(20 \text{ м})}{(0,10 \text{ Ом})} = \\ &= 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Площадь A провода круглого сечения связана с его диаметром d формулой $A = \pi d^2/4$. Следовательно, диаметр провода должен быть не меньше $d = \sqrt{4A/\pi} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2,1 \text{ мм}$.

Удельное сопротивление вещества зависит от температуры. Как правило, сопротивление металлов возрастает с температурой. Этому не следует удивляться: с повышением температуры атомы движутся быстрее, их расположение становится менее упорядоченным, и можно ожидать, что они будут сильнее мешать движению потока электронов. В узких диапазонах изменения температуры удельное сопротивление металла увеличивается с температурой практически линейно:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha[T - T_0]), \quad (26.6)$$

где ρ_T — удельное сопротивление при температуре T , ρ_0 — удельное сопротивление при стандартной температуре T_0 , а α — *температурный коэффициент сопротивления* (ТКС). Значения α приведены в табл. 26.2. Заметим, что у полупроводников ТКС может быть отрицательным. Это очевидно, поскольку с ростом температуры увеличивается число свободных электронов и они улучшают проводящие свойства вещества. Таким образом, сопротивление полупроводника с повышением температуры может уменьшаться (хотя и не всегда).

Пример 26.4. *Термометр сопротивления.* Зависимостью электрического сопротивления от температуры можно воспользоваться для точного измерения температуры. В термометрах сопротивления

обычно применяют платину, так как она устойчива к коррозии и имеет высокую точку плавления. Пусть при 0°C сопротивление платинового термометра составляет 164,2 Ом. После погружения тер-

мометра в сосуд с жидкостью его сопротивление становится равным 187,4 Ом. Чему равна температура жидкости?

Решение. Поскольку сопротивление R прямо пропорционально удельному сопротивлению ρ , объединим выражения (26.4) и (26.6) (положив $T_0 = 0^\circ\text{C}$) и получим

$$R = R_0(1 + \alpha T).$$

Здесь $R_0 = \rho_0 L/A$ — сопротивление платиновой проволоки при 0°C . Отсюда можно выразить T :

$$T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{187,4 \text{ Ом} - 164,2 \text{ Ом}}{(3,927 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(164,2 \text{ Ом})} = 35,9^\circ\text{C}.$$

Во многих случаях для измерения температуры используют *термисторы* — оксидные или полупроводниковые резисторы, сопротивление которых однозначно связано с температурой. Термисторы могут иметь очень малые размеры и благодаря этому быстро реагировать на изменения температуры.

Значения α зависят от температуры, поэтому следует обращать внимание на диапазон температур, в пределах которого справедливо данное значение (например, по справочнику физических величин). Если диапазон изменения температуры окажется широким, то линейность будет нарушаться, и вместо (26.6) надо использовать выражение, содержащее члены, которые зависят от второй и третьей степеней температуры: $\rho_T = \rho_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3)$, где коэффициенты β и γ обычно очень малы (мы положили $T_0 = 0^\circ\text{C}$), но при больших T вклад этих членов становится существенным.

При очень низких температурах удельное сопротивление некоторых металлов, а также сплавов и соединений падает в пределах точности современных измерений до нуля. Это свойство называют **сверхпроводимостью**; впервые его наблюдал нидерландский физик Гейке Камерлинг-Оннес (1853–1926) в 1911 г. при охлаждении ртути ниже 4,2 К. При этой температуре электрическое сопротивление ртути внезапно падало до нуля. Сверхпроводники переходят в сверхпроводящее состояние ниже *температуры перехода*, составляющей обычно несколько градусов Кельвина (чуть выше абсолютного нуля). Наблюдался электрический ток в сверхпроводящем кольце, который практически не ослабевал в отсутствие напряжения в течение нескольких лет.

В последние годы сверхпроводимость интенсивно исследуется с целью выяснить ее механизм и найти материалы, обладающие сверхпроводимостью при более высоких температурах, чтобы уменьшить стоимость и неудобства, обусловленные необходимостью охлаждения до очень низких температур¹⁾. Первую успешную теорию

¹⁾ Сейчас обнаружены и интенсивно исследуются керамические материалы, обладающие сверхпроводимостью при температурах выше 100 К. Читатель легко может представить революционный характер этого открытия. — *Прим. перев.*

сверхпроводимости создали Бардин, Купер и Шриффер в 1957 г.

Сверхпроводники уже используются в больших магнитах, где магнитное поле создается электрическим током (см. гл. 28), что значительно снижает расход электроэнергии. Разумеется, для поддержания сверхпроводника при низкой температуре тоже затрачивается энергия¹⁾.

26.5. Микроскопическая картина электропроводности. Плотность тока и скорость дрейфа носителей заряда

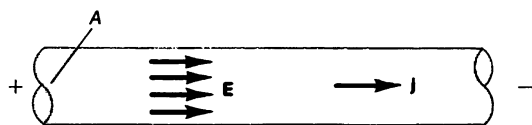
До сих пор в этой главе мы имели дело в основном с макроскопическим, так сказать, повседневным представлением об электрическом токе. Правда, мы знаем, что в металлических проводниках, согласно атомной теории, носителями электрического тока служат отрицательно заряженные электроны, а в растворах – положительные и отрицательные ионы. Рассмотрим теперь микроскопическую картину более подробно.

Если к концам проводника постоянного сечения приложена разность потенциалов, то вектор \mathbf{E} будет параллелен боковой поверхности проводника (рис. 26.7). Существование внутри проводника электрического поля \mathbf{E} не противоречит сделанному ранее выводу о том, что в электростатическом случае внутри проводника $\mathbf{E} = 0$: мы имеем дело теперь не с неподвижными зарядами. Если поле отлично от нуля, а свободные электроны могут перемещаться в проводнике, то под действием электрического поля они начнут двигаться. Если предположить, что все носители заряда неподвижны, то напряженность электрического поля \mathbf{E} должна быть равна нулю (и мы возвращаемся к электростатике).

Определим новую микроскопическую величину: **плотность тока \mathbf{j}** . Плотность тока определяется как *сила тока, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения* в данной точке пространства. Если плотность тока \mathbf{j} в

¹⁾ Сверхпроводники предполагается применять при создании обмоток для больших генераторов и электродвигателей, что позволит использовать очень большие токи. Разрабатываются также сверхпроводящие линии электропередач, в которых энергетические потери будут сведены к минимуму. Электростанции можно будет строить тогда вблизи источников топлива (каменного угля, газа и т.п.), а не вблизи крупных потребителей электроэнергии, и тем самым снизить расходы на транспортировку топлива. Сверхпроводники могут использоваться при создании скоростного наземного транспорта: сила отталкивания, возникающая в результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого сверхпроводящими электромагнитами транспортного средства, с вихревыми токами (разд. 30.6), наводимыми в полотне дороги, обеспечивает возникновение воздушной подушки и движение над полотном практически без трения.

Рис. 26.7. Электрическое поле \mathbf{E} в однородном проводнике с площадью поперечного сечения A , по которому течет ток I . Плотность тока $j = I/A$.



проводнике с площадью сечения A постоянна по его сечению, то

$$j = \frac{I}{A}, \quad \text{или} \quad I = jA. \quad (26.7)$$

Если же плотность тока меняется по сечению, то

$$I = \int \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A}, \quad (26.8)$$

где dA – элемент площади сечения, а I – сила тока через поверхность, по которой ведется интегрирование. Направление вектора плотности тока в любой точке совпадает с направлением, в котором будет двигаться помещенный в эту точку положительный пробный заряд. Другими словами, вектор \mathbf{j} в любой точке совпадает, вообще говоря, по направлению с вектором \mathbf{E} (рис. 26.7). (Инерционностью носителей заряда обычно можно пренебречь.) Плотность тока определена в каждой точке пространства. Сила тока I относится ко всему проводнику и поэтому является макроскопической величиной.

Направление вектора \mathbf{j} соответствует потоку положительных зарядов (что согласуется с принятым направлением тока). В проводнике подвижные носители заряда – это отрицательно заряженные электроны, и они движутся в направлении, противоположном \mathbf{j} или \mathbf{E} (на рис. 26.7 – влево). Сила, действующая на электрон в проводнике со стороны электрического поля напряженностью \mathbf{E} , равна $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}$, где $-e$ есть заряд электрона ($e = +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Однако электроны в среднем движутся без ускорения (если не считать короткого промежутка времени сразу после включения батареи) из-за столкновений с атомами проводника. Обусловленная этими столкновениями «тормозящая» сила уравнивает электрическую силу, и электроны быстро достигают скорости установившегося движения, которую называют *средней скоростью дрейфа* v_d носителей заряда (подобно установившейся скорости падения легкого тела в воздухе). Эта скорость называется скоростью дрейфа, поскольку она значительно меньше средней скорости теплового движения электронов. Согласно классической теории проводимости¹⁾, свободные электроны в металле представляют собой идеальный газ; они движутся с очень большой скоростью во всех направлениях, и на фоне этого беспорядочного

¹⁾ Классическая теория при всей своей наглядности не дает надежных количественных результатов; положение значительно улучшилось с появлением квантовой теории; см. замечание, следующее за примером 26.5.

дочного теплового движения происходит медленный «дрейф» в направлении электрического поля E (у отрицательно заряженных электронов – в противоположном направлении).

Силу тока в проводнике можно выразить через скорость дрейфа v_d . За время t электроны проходят вдоль проводника расстояние $l = v_d t$. Пусть в единице объема имеется n электронов проводимости. Число электронов, пересекающих сечение A проводника за время t , составляет nAl . Заряд, проходящий через это сечение, равен

$$Q = -enAl = -enAv_d t,$$

где $-e$ есть заряд электрона. Следовательно, сила тока равна

$$I = \frac{Q}{t} = -nev_d A, \quad (26.9)$$

а плотность тока составляет

$$j = \frac{I}{A} = -nev_d. \quad (26.10)$$

В векторной форме последнее равенство можно записать в виде

$$\mathbf{j} = -nev_d, \quad (26.11)$$

где знак минус означает, что направление (положительного) тока противоположно направлению скорости дрейфа электронов.

Формулу (26.11) можно обобщить на случай тока, обусловленного движением любых зарядов, например ионов в электролите. Если имеется несколько типов ионов (включая и свободные электроны) с плотностью n_i (число носителей в единице объема), зарядом q_i (для электронов $q_i = -e$) и скоростью дрейфа v_{di} , то результирующая плотность тока равна

$$\mathbf{j} = \sum_i n_i q_i v_{di}, \quad (26.12)$$

а сила тока I , протекающего через сечение A , перпендикулярное \mathbf{j} :

$$I = \sum_i n_i q_i v_{di} A.$$

Пример 26.5. По медному проводнику диаметром 3,20 мм течет ток силой 5,00 А. Определите а) плотность тока в проводнике; б) скорость дрейфа свободных электронов; в) среднеквадратичную скорость электронов в предположении, что они ведут себя подобно частицам

идеального газа при 20°C. Считайте, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон (остальные электроны связаны в атомах).

Решение. а) Площадь поперечного сечения проводника равна $A = \pi r^2 = = (3,14)(1,60 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 = 8,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Плотность тока равна

$$j = I/A = (5,00 \text{ А}) / (8,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2) = 6,22 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2.$$

б) Поскольку на каждый атом меди приходится один свободный электрон, число свободных электронов в единице объема n будет равно числу атомов Си. Атомная масса меди 63,5 а. е. м., и, следовательно, 63,5 г меди содержат $6,02 \cdot 10^{23}$ свободных электронов. Плотность меди $\rho = 8,89 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; число свободных электронов в единице объема равно

$$n = \left(\frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ электронов}}{63,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}} \right) \times (8,89 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3) = 8,43 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Наконец, согласно (26.10), скорость дрей-

фа электронов равна

$$v_d = \frac{j}{ne} = \frac{6,22 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2}{(8,43 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3})(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})} = 4,61 \cdot 10^{-5} \text{ м/с},$$

или всего лишь около 0,05 мм/с.

в) Рассматривая свободные электроны как идеальный газ (довольно грубое приближение), найдем по формуле (18.5)

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К})(293 \text{ К})}{(9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг})}} = 1,15 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Мы видим, что скорость дрейфа намного меньше среднеквадратичной скорости теплового движения электронов (примерно в 10^9 раз).

Полученный в п. «в» численный результат нельзя считать надежным. Количественные предсказания классической теории электронной проводимости, в которой свободные электроны уподобляются идеальному газу, сильно расходятся с опытными данными. Согласно квантовой теории, предсказания которой гораздо лучше согласуются с экспериментом, для свободных электронов *не справедлива* теорема о равном распределении энергии (разд. 20.4); поэтому расчеты по формуле $v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{3kT/m}$ неверны. В действительности скорость свободных электронов оказывается примерно в 15 раз больше, т. е. около $1,6 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ для меди при 20°С . Но здесь мы не будем вдаваться в подробности этой теории.

Равенство (26.3), $V = IR$, можно записать, введя микроскопические характеристики. Выразим сопротивление R через проводимость ρ :

$$R = \rho \frac{L}{A},$$

а I и V представим в виде

$$I = jA$$

и

$$V = EL;$$

последнее равенство следует из (24.4) при условии, что электрическое поле внутри проводника однородно; L — длина проводника (или его участка), а V — разность потенциалов на его концах. Тогда вместо $V = IR$ получим

$$EL = (jA) \left(\rho \frac{L}{A} \right) = j\rho L,$$

или

$$j = \frac{1}{\rho} E = \sigma E, \quad (26.13)$$

где $\sigma = 1/\rho$ – удельная проводимость. В случае металлического проводника ρ и σ не зависят от V , а значит, и от E . Итак, плотность тока j пропорциональна напряженности электрического поля E внутри проводника (закон Ома в дифференциальной форме). Уравнение (26.13), которое можно записать в векторной форме:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E},$$

иногда рассматривается как определение проводимости σ и удельного сопротивления ρ .

Пример 26.6. Какова напряженность электрического поля внутри проводника в примере 26.5?

Решение. Согласно табл. 26.2, для меди $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Зная, что $j = 6,22 \cdot 10^5$ А/м², получим $E = \rho j = (1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) $(6,22 \cdot 10^5$ А/м²) =

$= 1,04 \cdot 10^{-2}$ В/м. Для сравнения вспомним, что напряженность электрического поля между пластинами конденсатора может быть намного больше: скажем, в примере 25.6 величина E составляет 10^5 В/м. Таким образом, на практике вызвать электрический ток в проводнике может довольно слабое электрическое поле.

26.6. Электрическая мощность

Электрическая энергия удобна тем, что легко превращается в другие виды энергии. Например, электродвигатели (гл. 28) превращают электрическую энергию в механическую работу.

В других приборах – электронагревателях, электроплитах, тостерах, фенах для сушки волос – электрическая энергия превращается в тепловую с помощью проводящего сопротивления, называемого нагревательным элементом. В обыкновенной электрической лампе небольшая нить накала нагревается так сильно, что начинает светиться; лишь несколько процентов энергии превращается в свет, остальная же (свыше 90%) переходит в тепло. Сопротивление нагревательных элементов в бытовых электроприборах и нитей накала электрических ламп составляет от нескольких единиц до нескольких сотен Ом.

В таких приборах преобразование электрической энергии в свет и тепло происходит за счет того, что сила тока обычно бывает довольно большой и движущиеся электроны испытывают многочисленные столкновения с атомами проводника. При каждом таком столкновении часть кинетической энергии электрона передается атому, с которым он сталкивается. В результате кинетическая энергия атомов увеличивается и температура проводящего

элемента возрастает. Избыток тепловой (внутренней) энергии может за счет теплопроводности и конвекции передаваться воздуху в электронагревателе или кастрюле на плите, за счет теплового излучения поджаривать гренки в тостере или испускаться в виде света. Для определения мощности, преобразуемой электрическим прибором, воспользуемся известным фактом: при прохождении бесконечно малым зарядом dq разности потенциалов V изменение энергии составляет $dU = dqV$ [уравнение (24.2)]. Если оно происходит за время dt , то мощность P (т.е. скорость преобразования энергии) составит

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{dq}{dt} V.$$

Заряд, протекающий в единицу времени, dq/dt , представляет собой силу тока I . Следовательно,

$$P = IV. \quad (26.14)$$

Это общее соотношение характеризует мгновенную мощность, преобразуемую любым устройством; здесь I — сила тока, протекающего через устройство, а V — разность потенциалов на нем. Это же выражение характеризует мощность, потребляемую от источника, например от батареи. В системе СИ электрическая мощность измеряется в тех же единицах, что и любая мощность, — в ваттах (Вт); $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

Мощность, выделяющуюся на резисторе R , можно записать двумя способами, объединив закон Ома ($V = IR$) с формулой (26.14) ($P = IV$):

$$P = I(IR) = I^2 R, \quad (26.15a)$$

$$P = \left(\frac{V}{R}\right)V = \frac{V^2}{R}. \quad (26.15b)$$

Выражения (26.15a) и (26.15b) применимы только к резисторам, в то время как (26.14) справедливо в общем случае.

Пример 26.7. Рассчитайте сопротивление 12-вольтовой автомобильной лампочки мощностью 40 Вт.

Решение. Выразим R из (26.15b) и подставим $P = 40 \text{ Вт}$ и $V = 12 \text{ В}$:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(12 \text{ В})^2}{40 \text{ Вт}} = 3,6 \text{ Ом}.$$

Таково сопротивление лампочки, горящей в полный накал; у холодной лампочки сопротивление намного меньше.

Рассчитываясь за электричество, мы оплачиваем не мощность, а энергию. Поскольку мощность представляет собой *скорость* преобразования энергии, полная энергия, израсходованная каким-либо устройством, равна просто произведению потребляемой мощности на время, в течение которого это устройство включено. Если мощность выражена в ваттах, а время — в секундах, то значение

энергии будет получено в джоулях (Дж); $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$. На практике энергию обычно измеряют в гораздо более крупных единицах – киловатт-часах (кВт · ч):

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = (1000 \text{ Вт})(3600 \text{ с}) = 3,60 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Пример 26.8. Электрический нагреватель потребляет ток силой 15 А от сети напряжением 120 В. Какую мощность он потребляет и во что обойдется его эксплуатация за месяц (30 дней), если он ежедневно включается на 3 ч, а тариф за электроэнергию составляет 0,060 долл. за

киловатт-час? (Для простоты ток можно считать постоянным.)

Решение. Мощность равна $P = IV = (15 \text{ А})(120 \text{ В}) = 1800 \text{ Вт} = 1,8 \text{ кВт}$. Оплата 90 ч работы нагревателя составит $(1,8 \text{ кВт})(90 \text{ ч})(0,060 \text{ долл.}) = 9,72 \text{ долл.}$

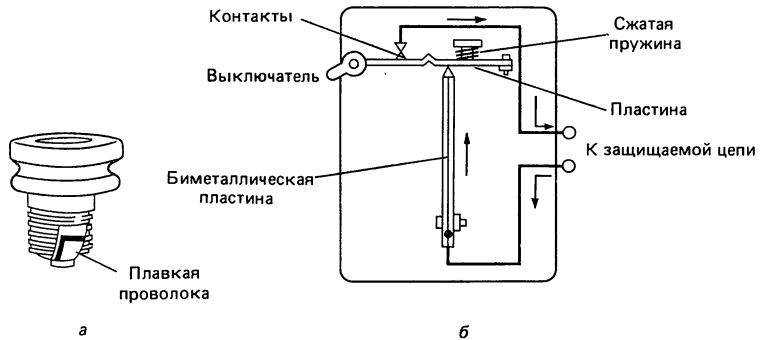


Рис. 26.8. *а* – плавкий предохранитель. Когда ток превышает допустимое значение, проволока плавится и цепь размыкается. После устранения неисправностей в цепи предохранитель следует заменить. *б* – автоматический предохранитель. Электрический ток проходит по биметаллической пластине. Если сила тока превышает допустимое значение, биметаллическая пластина при нагреве изгибается настолько, что ее конец доходит влево до желобка на подпружиненной контактной пластине, которая отходит от неподвижного контакта, размыкая цепь. При этом и выключатель снаружи предохранителя перебрасывается в другое положение. Когда биметаллическая пластина охладится, предохранитель может быть включен снова поворотом выключателя.

Провода, подводящие электрический ток к осветительным приборам и электроустановкам, обладают некоторым сопротивлением, обычно достаточно малым. Поэтому при большой силе тока провода нагреваются и в них выделяется тепловая энергия мощностью $I^2 R$, где R – сопротивление проводов. Это опасно тем, что провода в стене здания могут нагреться столь сильно, что вызовут пожар. Чем толще провод, тем меньше его сопротивление [см. (26.4)] и тем большую силу тока он может выдержать без значительного нагрева. Если сила тока превышает допустимое значение, то говорят о «перегрузке». Разумеется, электропроводку зданий следует проектировать таким образом, чтобы она была способна выдержать любую предполагаемую нагрузку. Для защиты от перегрузок электрическую сеть снабжают плавкими предохранителями («пробками») или автоматическими выключателями. Эти устройства (рис. 26.8) размыкают цепь, когда сила тока в ней превышает некоторое значение. Предохранитель, рассчитанный на 20 А, перегорит, а автомат отключится, если сила тока превысит 20 А. Если повторно перегорает предохранитель или срабатывает автомат, то могут быть две причины: либо в сеть включено слишком много потребителей электроэнергии, либо произошло короткое замыкание, т. е. из-за плохой изоляции два токонесящих провода соединились «накоротко». Сопротивление цепи в этом случае будет крайне малым, и ток резко

возрастает. Короткое замыкание следует немедленно устранить.

Квартирная электропроводка устроена таким образом, что каждый включенный в сеть прибор оказывается под напряжением 120 В («сетевое напряжение»). Если перегорает предохранитель или срабатывает автомат, прикиньте для начала, какой ток потребляют ваши электроприборы. Пусть, например, электрическая лампа потребляет $I = P/V = 100 \text{ Вт}/120 \text{ В} = 0,8 \text{ А}$, электронагреватель $1800 \text{ Вт}/120 \text{ В} = 15,0 \text{ А}$, электроплита $1300 \text{ Вт}/120 \text{ В} = 10,8 \text{ А}$, итого 26,6 А. Предохранитель, рассчитанный на 20 А, конечно, перегорит. Если же установлен предохранитель на 30 А, то причина, видимо, в коротком замыкании (которое чаще всего происходит в шнурах электроприборов).

В электронных схемах следует учитывать тепло, рассеиваемое на резисторах. Допустимую мощность рассеяния на резисторе ($I^2 R$) можно примерно оценить по его габаритам; чаще всего используются резисторы, рассчитанные на мощность 0,25, 0,5 и 1 Вт; чем выше рассеиваемая мощность ($= I^2 R$), тем больше габариты.

26.7. Переменный ток

Если электрическую цепь подключить к батарее, ток пойдет в одном направлении. Такой ток называют *постоянным* (рис. 26.9, а). Генераторы на электростанциях вырабатывают *переменный ток*: он меняет направление много раз в секунду и обычно является синусоидальным (рис. 26.9, б). Почти повсеместно в жилые дома и на предприятия поступает переменный ток.

Как мы увидим в гл. 30, электрический генератор создает синусоидальное напряжение. Соответственно синусоидальным оказывается и ток (рис. 26.9, б). Зависимость напряжения от времени можно записать в виде

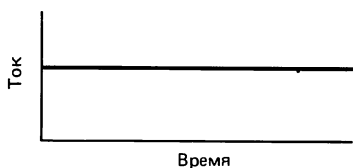
$$V = V_0 \sin 2\pi ft.$$

Потенциал V периодически изменяется между $+V_0$ и $-V_0$; величина V_0 называется амплитудой напряжения (или *пиковым* напряжением). Частота f — число полных колебаний в секунду; на большей части территории США и Канады $f = 60 \text{ Гц}$ (колебаний в секунду); в других странах¹⁾ «промышленная частота» 50 Гц.

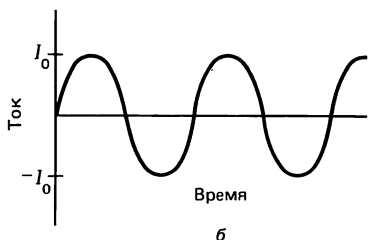
Если к сопротивлению R приложена разность потенциалов V , то по закону Ома

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \sin 2\pi ft = I_0 \sin 2\pi ft. \quad (26.16)$$

¹⁾ Например, в СССР.—Прим. перев.



а



б

Рис. 26.9. а — постоянный ток; б — переменный ток.

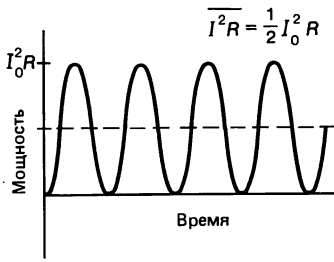


Рис. 26.10. Мощность, рассеиваемая на резисторе в цепи переменного тока.

Величина $I_0 = V_0/R$ называется *амплитудным* или *пиковым* значением силы тока. В «положительные» полупериоды ток идет в одном направлении, в «отрицательные» – в противоположном. Из рис. 26.9, б видно, что переменный ток половину времени имеет одно направление, а половину – противоположное, так что среднее значение силы тока равно нулю. Это не означает, однако, что мощность равна нулю и что резистор не выделяет тепло. Электроны в резисторе движутся то в одну сторону, то в другую, в результате чего выделяется тепло. Мгновенная мощность, рассеиваемая на резисторе R , равна

$$P = I^2 R = I_0^2 R \sin^2 2\pi ft.$$

Поскольку в выражение входит квадрат силы тока, мощность всегда положительна (рис. 26.10). Значение $\sin^2 2\pi ft$ изменяется от 0 до 1; нетрудно показать (см. задачу 49), что его среднее значение равно $1/2$. Таким образом, *средняя мощность \bar{P}* равна

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0^2 R.$$

Мощность можно также записать в виде $P = V^2/R = (V_0^2/R) \sin^2 2\pi ft$, и тогда средняя мощность равна

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{R}.$$

Для определения средней мощности важно не просто среднее значение напряжения или силы тока (равное здесь нулю), а среднее значение *квадрата* напряжения и силы тока: $\bar{I}^2 = 1/2 I_0^2$ и $\bar{V}^2 = 1/2 V_0^2$. Извлекая из этих выражений квадратный корень, мы получим среднеквадратичное значение силы тока

$$I_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\bar{I}^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 = 0,707 I_0 \quad (26.17a)$$

и напряжения

$$V_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\bar{V}^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_0 = 0,707 V_0. \quad (26.17b)$$

Среднеквадратичные значения напряжения V и силы тока I называют также *эффективными* (или *действующими*) значениями. Они удобны тем, что их можно непосредственно подставлять в формулы для вычисления средней мощности (26.14) и (26.15); например, $\bar{P} = 1/2 I_0^2 R = I_{\text{ср.кв}}^2 R$. Другими словами, мощность переменного тока равна мощности постоянного тока с эффективными значениями напряжения и силы тока. Чаще всего поэтому переменный ток характеризуют *эффективными значениями* силы тока и напряжения. В США и Канаде, например, стандартное напряжение сети переменного тока равно

120 В ($V_{\text{эфф}}$), что соответствует амплитудному значению $V_0 = \sqrt{2} V_{\text{эфф}} = 170$ В.

В Европе эффективное напряжение равно 240 В, амплитудное – соответственно 340 В.¹⁾

Пример 26.9. Вычислите сопротивление и амплитудное значение тока в фене для сушки волос мощностью 1000 Вт, который включен в сеть с напряжением 120 В. Что произойдет, если этот фен включить в сеть с напряжением 240 В?

Решение. Эффективное значение силы тока равно

$$I_{\text{эфф}} = \frac{\bar{P}}{V_{\text{эфф}}} = \frac{1000 \text{ Вт}}{120 \text{ В}} = 8,33 \text{ А},$$

а $I_0 = \sqrt{2} I_{\text{эфф}} = 11,8$ А. Сопротивление

фена равно

$$R = \frac{V_{\text{эфф}}}{I_{\text{эфф}}} = \frac{120 \text{ В}}{8,33 \text{ А}} = 14,4 \text{ Ом}.$$

Сопротивление можно рассчитать и используя пиковые значения: $R = V_0/I_0 = 170 \text{ В}/11,8 \text{ А} = 14,4 \text{ Ом}$. Если включить фен в сеть 240 В, средняя мощность составит

$$\bar{P} = \frac{V_{\text{эфф}}^2}{R} = \frac{(240 \text{ В})^2}{(14,4 \text{ Ом})} = 4000 \text{ Вт}.$$

При этом, конечно, перегорит нагревательный элемент или обмотки двигателя.

В этом разделе приведены лишь элементарные сведения о переменном токе. Подробнее мы займемся цепями переменного тока в гл. 32. В гл. 27 речь будет идти только о постоянном токе.

Заключение

Электрическая батарея преобразует химическую энергию в электрическую и служит источником разности потенциалов, или *электродвижущей силы* (ЭДС). Простейшая батарея (гальванический элемент) состоит из двух электродов из разнородных металлов, помещенных в жидкий электролит.

Сила электрического тока I характеризует скорость перемещения электрического заряда и измеряется в амперах: $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$ (количество заряда в кулонах, проходящее ежесекундно через данное сечение). За направление электрического тока обычно принимают направление перемещения положительных зарядов. В проводнике носителями тока в действительности служат отрицательные свободные электроны, и направление их движения противоположно условно принятому направлению тока. По условию положительный ток всегда течет от более высокого потенциала к более низкому.

Закон Ома утверждает, что сила тока в хорошем проводнике пропорциональна разности потенциалов на его концах; коэффициент пропорциональности называют

¹⁾ В СССР эффективное напряжение равно 220 В, амплитудное – 310 В. – Прим. перев.

сопротивлением R ; $V = IR$. Единицей сопротивления служит ом (Ом); $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}$.

Сопротивление R проводника обратно пропорционально площади его сечения A и прямо пропорционально длине проводника L , а также удельному сопротивлению ρ , характеризующему материал, из которого изготовлен проводник: $R = \rho L/A$. Удельное сопротивление металлов возрастает с температурой, а у полупроводников может убывать. Сверхпроводники – это материалы, электрическое сопротивление которых практически равно нулю.

Плотностью тока \mathbf{j} называют силу тока, отнесенную к единичной площади сечения. С микроскопической точки зрения плотность тока связана с числом носителей заряда в единице объема n , величиной заряда носителя q и скоростью их дрейфа v_d соотношением $\mathbf{j} = nqv_d$. Напряженность электрического поля внутри проводника и плотность тока связаны соотношением $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$, где $\sigma = 1/\rho$.

Скорость, с которой электрическая энергия преобразуется на сопротивлении R в другие виды энергии (свет, тепло), равна произведению силы тока на напряжение и измеряется в ваттах: мощность $P = IV$. Используя закон Ома, это равенство можно также записать в виде $P = I^2 R = V^2/R$. Полная электрическая энергия, потребляемая любым устройством, равна произведению мощности на время включения этого устройства. В системе СИ энергия измеряется в джоулях, $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$; на практике используется более крупная единица – киловатт-час; ($\text{кВт} \cdot \text{ч}$); $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Электрический ток может быть постоянным, т. е. идти непрерывно в одном направлении, и переменным, т. е. периодически менять свое направление с определенной частотой (в электросети обычно 60 Гц). Чаще всего сила переменного тока зависит от времени по синусоидальному закону: $I = I_0 \sin 2\pi ft$ (как и переменное напряжение). Эффективные (среднеквадратичные) значения силы синусоидального переменного тока и напряжения равны $I_{\text{эфф}} = I_0/\sqrt{2}$ и $V_{\text{эфф}} = V_0/\sqrt{2}$, где V_0 и I_0 представляют собой амплитудные (пиковые) значения. Выражения для мощности $P = IV = I^2 R = V^2/R$ справедливы и для переменного тока, если использовать в них эффективные (среднеквадратичные) значения силы тока и напряжения.

Вопросы

1. Когда вы открываете водопроводный кран, обычно сразу же начинает течь вода. Почему вам не приходится ждать, пока вода дойдет от вентиля до отверстия крана? Не так ли обстоит дело, когда проводник подключает к клеммам батареи?

2. «Емкость» автомобильных аккумуляторов часто обозначают в ампер-часах (А·ч). Что означает эта характеристика?

3. Когда гальванический элемент включают в цепь, электроны движутся во внешней цепи от отрицательного полюса к положительному. Внутри же элемента электроны движутся к отрицательному электроду. Как это объяснить?

4. Расходится ли электрический ток в резисторе?

5. Проведите аналогию между системой кровообращения и электрической цепью. Что играет роль «сердца» в электрической цепи и т.п.?

6. Придумайте схему, позволяющую независимо включать и выключать лампу с помощью двух выключателей в разных местах комнаты (см. рис. 26.11).

7. Могут ли медный и алюминиевый провода одной длины иметь одинаковое сопротивление? Объясните.

8. Стороны параллелепипеда из графита равны a , $2a$, $3a$. К каким противоположным граням следует подсоединить выводы, чтобы электрическое сопротивление было а) минимальным; б) максимальным?

9. Продумайте и опишите опыт, позволяющий определить удельное сопротивление материала, из которого изготовлен большой параллелепипед.

10. Как мы видели в примере 26.5, скорость дрейфа электронов составляет обычно доли миллиметра в секунду. Иначе говоря, электронам может потребоваться несколько часов, чтобы пройти расстояние 1 м. Почему же лампа загорается сразу после включения?

11. Разность потенциалов на концах проводника длиной L и радиусом R равна V . Как изме-

нится скорость дрейфа электронов, если удвоить а) длину L ; б) радиус R ; в) напряжение V ?

12. Сравните скорость дрейфа и силу тока в двух проводниках одинаковой формы и размера с одинаковой плотностью атомов при условии, что на один атом одного проводника приходится вдвое больше свободных электронов, чем у другого.

13. Один из выводов автомобильного аккумулятора считается заземленным, хотя с землей он, конечно, не соединен. Что имеют в виду под «заземлением»?

14. Согласно формуле $P = V^2/R$, мощность, рассеиваемая резистором, должна уменьшаться с ростом сопротивления, а формула $P = I^2 R$ подразумевает обратное. Нет ли здесь противоречия? Объясните.

15. Что происходит, когда перегорает электрическая лампа?

16. В какой из двух ламп, мощностью 100 Вт или 75 Вт, протекает ток большей силы?

17. Для передачи электроэнергии на большие расстояния используются очень высокие напряжения. Объясните, каким образом высокие напряжения позволяют уменьшить потери в линиях электропередач.

18. Почему опасно заменять предохранитель на 15 А, который то и дело перегорает, предохранителем на 25 А?

19. Электрическая лампа, питаемая переменным током очень низкой частоты (скажем, 10 Гц), заметно мерцает. Почему?

20. Франклин вполне мог бы назвать положительные заряды отрицательными, а отрицательные положительными, так что заряд электрона был бы положительным. Как это повлияло бы на различные результаты, обсуждавшиеся в этой главе?

Задачи

Раздел 26.2

1. (I) На станции техобслуживания аккумулятор заряжают током силой 6,5 А в течение 5,0 ч. Какой заряд сообщают аккумулятору?

2. (I) По проводу течет ток силой 1,00 А. Сколько электронов проходит через сечение провода каждую секунду?

3. (I) Чему равна сила тока (в амперах), когда 1000 ионов Na^+ ($Q = +e$) проходят через клеточную мембрану за 4,0 мкс?

Раздел 26.3

4. (I) Какое напряжение падает на сопротивлении 25 Ом, если сила тока через него 1,2 А?

5. (I) Два одинаковых элемента напряжением

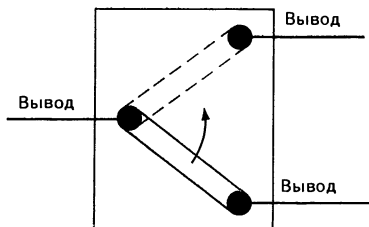


Рис. 26.11.

1,5 В соединены последовательно с лампой, сопротивление которой 10 Ом. Сколько электронов покидает каждый элемент ежеминутно?

6. (II) Птица сидит на проводе линии электропередачи, по которому течет ток силой 1800 А. Сопротивление провода составляет $2,0 \cdot 10^{-5}$ Ом на погонный метр, а лапы птицы отстоят друг от друга на расстояние 2,5 см. Под каким напряжением находится птица?

7. (II) Проводимость G определяется как величина, обратная электрическому сопротивлению R : $G = 1/R$. Единицей проводимости служит обратный Ом (Ом^{-1} , мо) или сименс (См). Чему равна проводимость (в сименсах) тела, если при напряжении 12,0 В через него протекает ток силой 800 мА?

Раздел 26.4

8. (I) Чему равно сопротивление отрезка медного провода длиной 2,2 м и диаметром 1,8 мм?

9. (I) Провод длиной 20,0 м и диаметром 1,50 мм обладает сопротивлением 2,50 Ом. Каким будет сопротивление провода из того же материала длиной 35,0 м и диаметром 3,00 мм?

10. (I) Может ли медный провод диаметром 2,00 мм иметь такое же сопротивление, как вольфрамовый одинаковой с ним длины? Приведите численный расчет.

11. (II) Отрезок провода разрезали пополам и соединили куски параллельно. Как изменилось сопротивление?

12. (II) У лампы мощностью 100 Вт сопротивление нити накала в холодном состоянии равно 12 Ом, а во включенном (горячем) — 140 Ом. Оцените температуру раскаленной нити, считая температурный коэффициент сопротивления равным $\alpha = 0,0060 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

13. (II) Ребра параллелепипеда из графита ориентированы по осям x , y и z и равны соответственно 1,0, 2,0 и 4,0 см. Определите сопротивление электрическому току, протекающему вдоль а) оси x ; б) оси y ; в) оси z . Удельное сопротивление равно $\rho = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

14. (II) Проводник длиной 12,0 м составлен из двух отрезков медного и алюминиевого проводов одинаковых длины и диаметра (3,0 мм). Каким должно быть напряжение на концах проводника, чтобы сила тока составила 6,0 А?

15. (II). а) Покажите, что для прямого проводника, расположенного вдоль оси x и имеющего площадь сечения A , скорость переноса заряда дается формулой

$$\frac{dq}{dt} = -\sigma A \frac{dV}{dx},$$

где dV/dx — градиент потенциала, а σ — удельная

проводимость. б) Проведите аналогию с теплопроводностью [см. разд. 19.7 и формулу (19.2)]. Существует ли связь между удельной проводимостью σ и теплопроводностью K ?

16. (II) Полый цилиндрический резистор с внутренним радиусом R_1 , внешним радиусом R_2 и длиной L изготовлен из материала с удельным сопротивлением ρ . а) Покажите, что для тока, текущего по радиусу наружу, сопротивление резистора равно

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

(Подсказка: рассмотрите цилиндрические слои и выполните интегрирование.) б) Определите R такого резистора из углерода, если $R_1 = 1,0 \text{ мм}$, $R_2 = 1,8 \text{ мм}$, $L = 1,0 \text{ см}$. в) Определите R при тех же параметрах, если ток течет вдоль оси резистора.

17. (II) Провод с сопротивлением 1,00 Ом растянули по длине втрое. Чему теперь равно его сопротивление?

18. (II) В некоторых приложениях требуется, чтобы сопротивление не зависело от температуры. Предположим, что резистор 2,2 кОм состоит из последовательно соединенных углеродного и проволочного нихромового резисторов. Каким должно быть сопротивление каждого из них (при 0°C), чтобы их общее сопротивление не зависело от температуры?

19. (II) Выведите формулу для полного электрического сопротивления току, протекающему наружу через сферическую оболочку с внутренним радиусом r_1 , внешним радиусом r_2 и удельной проводимостью σ .

20. (III) Нить накала электрической лампы имеет сопротивление 12 Ом при 20°C и 140 Ом в горячем состоянии (см. задачу 12). а) Рассчитайте температуру нити накала включенной лампы с учетом изменения длины и площади сечения нити вследствие теплового расширения (для вольфрама $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). б) Какая доля изменения сопротивления в этом диапазоне температур обусловлена тепловым расширением и какая температурной зависимостью удельного сопротивления ρ ? Воспользуйтесь формулой (26.6).

21. (III). Резистор с сопротивлением 38,0 Ом изготовлен из медного провода массой 11,2 г. Чему равны диаметр провода и его длина?

Раздел 26.5

22. (II) По медному проводу диаметром 0,40 мм течет слабый ток 3,0 мкА. Чему равны а) скорость дрейфа электронов; б) плотность тока; в) напряженность электрического поля внутри проводника?

23. (I) В растворе с концентрацией ионов Na^+ $5,00$ моль/ м^3 скорость их дрейфа составляет $5,00 \cdot 10^{-4}$ м/с, а скорость дрейфа ионов SO_4^{2-} равна $2,00 \cdot 10^{-4}$ м/с; плотность тока равна нулю. Какова концентрация ионов SO_4^{2-} ?

24. (II) На большой высоте в атмосфере Земли ионы He^{2+} с концентрацией $3,5 \cdot 10^{12}$ м^{-3} движутся к северу со скоростью $2,0 \cdot 10^6$ м/с, а ионы O_2^- с концентрацией $8,0 \cdot 10^{11}$ м^{-3} движутся к югу со скоростью $8,5 \cdot 10^6$ м/с. Определите величину и направление плотности тока \mathbf{j} .

25. (III) Рассматривая электроны в проводнике как идеальный газ и считая, что в промежутке между столкновениями с атомами проводника они движутся с ускорением $a = eE/m$, покажите, что удельное сопротивление ρ дается выражением

$$\rho = \frac{2mv}{ne^2 l_m},$$

где v – средняя скорость электронов (не скорость дрейфа!), l_m – средняя длина свободного пробега электронов между столкновениями.

Раздел 26.6

26. (I) Какой ток течет в лампе мощностью $6,0$ Вт, подключенной к источнику напряжения 12 В, на которое она рассчитана?

27. (I) Какую максимальную мощность потребляет транзисторный радиоприемник с напряжением питания $9,0$ В, если максимальная потребляемая им сила тока равна 400 мА?

28. (I) Какое максимальное напряжение можно приложить к резистору сопротивлением 200 Ом, если его паспортная мощность рассеяния составляет $1/4$ Вт?

29. (I) Уходя спать, вы забыли выключить в кухне лампу мощностью 200 Вт, которая горела 8 ч. Во что это вам обойдется, если тариф за электроэнергию составляет $0,065$ долл. за 1 кВт·ч?

30. (I) Какое количество энергии запасено в полностью заряженной аккумуляторной батарее напряжением 12 В и емкостью 50 А·ч?

31. (I) Во что обойдется круглосуточно горящая в течение года лампочка мощностью 25 Вт в подъезде вашего дома при тарифе $0,08$ долл. за 1 кВт·ч?

32. (II) Водитель забыл выключить фары автомобиля. Если мощность каждой из двух передних фар равна 40 Вт, а каждого из двух задних огней 6 Вт (всего 92 Вт), то на сколько времени хватит свежезаряженного 12 -вольтового аккумулятора емкостью 45 А·ч? (Считайте, что на каждую лампу подается напряжение 12 В.)

33. (II) Металлический провод в нагревательном элементе электрокамина мощностью

1800 Вт (напряжение 120 В) имеет длину $6,8$ м. Каков его диаметр?

34. (II) В доме используются электроприборы: нагреватель мощностью $3,5$ кВт в течение $2,5$ ч в сутки, 6 ламп по 100 Вт 5 ч в сутки, электроплита мощностью $3,3$ кВт $1,2$ ч в сутки и ряд других приборов, расходующих в среднем $1,6$ кВт·ч в сутки. а) Каким будет месячный (30 дней) счет за электроэнергию при тарифе $0,070$ долл. за 1 кВт·ч? б) Сколько угля (теплотворная способность 7000 ккал/кг) придется сжечь на тепловой электростанции, КПД которой равен 35% , чтобы обеспечивать этот дом электроэнергией в течение года?

35. (II) Чему равен КПД электродвигателя мощностью (на валу) $0,50$ л. с., если он потребляет силу тока $4,4$ А от сети 120 В?

36. (II) Электростанция снабжает электроэнергией завод по проводам с сопротивлением $3,2$ Ом; потребляемая заводом мощность составляет 360 кВт. Насколько уменьшатся потери, если повысить напряжение в линии электропередач с 12000 до 40000 В?

37. (II) Электропроводка должна выполняться достаточно толстым проводом, чтобы он не нагревался и не создавал опасности пожара. Каким должен быть диаметр медного провода, если проводка рассчитана на максимальную силу тока 40 А и на погонный метр провода не должно выделяться более $1,8$ Вт тепла?

38. (II) Фен для сушки волос потребляет мощность 1200 Вт и рассчитан на напряжение 117 В. Насколько уменьшится потребляемая мощность, если напряжение упадет до 105 В? (Изменением сопротивления пренебрегите.) Как изменится ответ при учете температурной зависимости сопротивления?

39. (II) Сила тока в обмотке электромагнита, подключенного к сети 240 В, равна $6,60$ А. Каким должен быть расход воды охлаждения обмоток, если температура воды не должна повышаться более чем на $8,00$ °С?

40. (II) Маленьким электрокипятильником можно вскипятить в автомобиле стакан воды для кофе. Какую силу тока потребляет кипятильник от аккумулятора с напряжением 12 В, если за 5 мин он нагревает 200 мл воды от 5 до 95 °С?

41. (II) Для обогрева комнаты объемом 36 м^3 используется электрический нагреватель. Воздух поступает с улицы при температуре 5 °С и полностью обновляется дважды в час. Потери тепла через стены составляют примерно 500 ккал/ч. Какую мощность должен иметь нагреватель, чтобы температура воздуха в комнате поддерживалась на уровне 20 °С? (Удельная теплоемкость воздуха равна примерно $0,17$ ккал/кг·°С.)

42. (II) В электромобиле источником энергии служит аккумулятор. Предположим, что для питания маленького электромобиля массой 650 кг для доставки почты используется 10 аккумуляторов с напряжением каждый 12 В и емкостью 70 А·ч. Допустим, что электромобиль движется по ровной дороге со средней скоростью 30 км/ч; сила трения равна в среднем 200 Н. Будем считать КПД равным 100% и пренебрежем затратами энергии на ускорение до номинальной скорости. При торможении и остановке энергия не расходуется, так как электродвигатель работает вхолостую. а) Определите мощность электродвигателя в лошадиных силах. б) Сколько километров составит приблизительно пробег между зарядками аккумуляторов?

Раздел 26.7

43. (I) Переменное напряжение с амплитудой 80 В приложено к резистору 60 Ом. Чему равны эффективная и амплитудная силы тока через резистор?

44. (I) Чему равно сопротивление включенной лампы мощностью 60 Вт, рассчитанной на (эф-

фективное) напряжение 120 В переменного тока?

45. (I) Вычислите амплитудное значение силы тока через резистор 2,2 кОм, на который подано переменное напряжение 240 В.

46. (II) Амплитудное значение силы переменного тока, потребляемого устройством мощностью 600 Вт, равно 3,0 А. Чему равно эффективное значение напряжения на этом устройстве?

47. (II) Нагреватель с сопротивлением 10 Ом включен в сеть переменного тока напряжением 240 В. Чему равна средняя потребляемая мощность? Чему равны максимальная и минимальная мгновенные мощности?

48. (II) Пусть сила тока изменяется по закону $I = 2,5 \sin 120t$, где I выражается в амперах и t – в секундах. а) Чему равна частота? б) Чему равно эффективное значение силы тока? в) Если этот ток течет через резистор 50 Ом, то по какому закону изменяется во времени напряжение на резисторе?

49. (II) Покажите, что среднее за большое число периодов значение $\sin^2 2\pi ft$ равно $1/2$. (Подсказка: воспользуйтесь интегрированием.)