

Г. Я. Мякишев, М. А. Петрова

# ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано  
Министерством просвещения  
Российской Федерации

*2-е издание, стереотипное*

МОСКВА

 ДРОФА

2020

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

# 11

к л а с с

 | российский  
учебник

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я72  
М99

**Одобрено Научно-редакционным советом корпорации  
«Российский учебник» под председательством академиков  
Российской академии наук В. А. Тишкова и В. А. Черешнева**

**Авторский коллектив:**

Г. Я. Мякишев, М. А. Петрова, О. С. Угольников, С. В. Пилипенко,  
В. В. Кудрявцев, С. В. Степанов, В. Ф. Комиссаров, А. А. Заболотский

**Мякишев, Г. Я.**

**М99** Физика : Базовый уровень : 11 класс : учебник / Г. Я. Мякишев, М. А. Петрова, О. С. Угольников и др. — 2-е изд., стереотип. — М. : Дрофа, 2020. — 476, [4] с. : ил. — (Российский учебник).

ISBN 978-5-358-23443-7

Учебник предназначен для учащихся 11 классов, изучающих физику на базовом уровне, создан с учётом современных научных представлений и включает следующие разделы: «Электродинамика (продолжение)», «Колебания и волны», «Квантовая физика и астрофизика».

Методический аппарат учебника составляют вопросы, система заданий, включающих вычислительные и графические задачи, вопросы для обсуждения, содержащие качественные задачи, задания для экспериментальной проектной деятельности, темы рефератов и проектов, описания лабораторных работ.

Большое количество красочных иллюстраций, графиков и схем, разнообразные вопросы и задания, а также дополнительные сведения и любопытные факты способствуют эффективному усвоению учебного материала.

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования.

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я72

ISBN 978-5-358-23443-7

© ООО «ДРОФА», 2019



# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА (продолжение)

Дальнейшее развитие науки об электричестве связано с изучением процессов, наблюдаемых при движении заряженных частиц. Первые работы в этом направлении связаны с именами итальянских учёных Луиджи Гальвани (1737—1798) и Алессандро Вольта (1745—1827). Гальвани обнаружил так называемое «животное электричество», а Вольта правильно истолковал его опыты и изобрёл первый в истории науки источник постоянного тока. В начале XIX в. электричество и магнетизм рассматривались как различные физические явления, хотя неоднократно высказывалась мысль об их взаимосвязи. В 1820 г. датский учёный Ханс Эрстед (1777—1851) обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку. В том же году французский физик Андре Мари Ампер (1775—1836) экспериментально обнаружил магнитное взаимодействие проводников с токами. Результаты опытов Эрстеда и Ампера наглядно продемонстрировали связь между электрическими и магнитными явлениями.

Основополагающий вклад в развитие электродинамики внёс английский физик Майкл Фарадей (1791—1867). В 1831 г. он экспериментально открыл явление электромагнитной индукции. Кроме того, Фарадей предложил концепцию поля, открыл законы электролиза, исследовал магнитные свойства вещества и др. Обобщая экспериментальные исследования Фарадея по электромагнитной индукции, британский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) создал теорию электромагнитного поля. В её рамках изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле, в свою очередь, порождает магнитное поле. Эти изменяющиеся поля существуют нераздельно и представляют собой единое электромагнитное поле. Возмущения электромагнитного поля (электромагнитные колебания) распространяются в пространстве в виде электромагнитных волн.

Продолжение изучения электродинамики связано с рассмотрением законов постоянного тока, протекания электрического тока в различных средах, магнитных явлений, явления электромагнитной индукции, электромагнитных колебаний и волн.

В данной главе мы рассмотрим физические величины, характеризующие постоянный электрический ток, а также способы их измерения. Особое внимание обратим на законы постоянного тока: закон Ома для участка электрической цепи, закон Ома для полной (замкнутой) цепи и закон Джоуля — Ленца. С их помощью мы научимся определять параметры электрических цепей, а также объяснять действия разнообразных электротехнических устройств.

## § 1

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПРОВОДНИКАХ

**ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.** Движение заряженных частиц в проводнике мы не наблюдаем. Однако о существовании электрического тока можно судить по различным явлениям, которые он вызывает. Такие явления называют *действиями электрического тока*.

1. Проводник, по которому протекает электрический ток, нагревается. Это *тепловое действие тока*. Именно благодаря тепловому действию тока нагреваются спирали в электроплитке, уютге, раскаляется добела вольфрамовая нить в электрической лампочке.

2. Электрический ток может изменять химический состав проводника. В этом проявляется *химическое действие тока*. Например, при прохождении тока через раствор медного купороса из раствора выделяется медь, а при прохождении тока через подкисленную воду она разлагается на водород и кислород. Химическое действие имеет место лишь при прохождении тока через растворы или расплавы электролитов.

3. Электрический ток оказывает *магнитное действие*. Расположенная вдоль проводника с током магнитная стрелка поворачивается перпендикулярно проводнику (рис. 1.1). Это явление было обнаружено Эрстедом

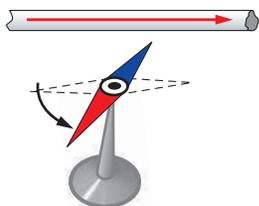


Рис. 1.1

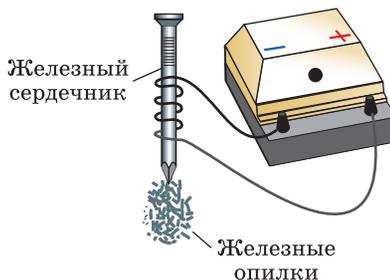


Рис. 1.2

в 1820 г. Если изолированную проволоку намотать на железный гвоздь, то он становится магнитом и притягивает железные опилки (рис. 1.2).

Магнитное действие тока, в отличие от теплового и химического действий, является основным, так как оно сопровождает ток всегда.

**ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК?** Дадим строгое определение тому, что называют электрическим током.

**Упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц называют электрическим током.**

Электрический ток существует лишь тогда, когда происходит *перенос электрических зарядов* с одного места в другое. Если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, свободные электроны в куске металла, то переноса заряда не происходит (рис. 1.3, а). Электрический заряд перемещается через поперечное сечение проводника в определённую сторону, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в упорядоченном движении заряженных частиц (рис. 1.3, б). В этом случае в проводнике устанавливается электрический ток.

Электрический ток возникает при упорядоченном движении свободных электронов в металле, положительных и отрицательных ионов в водных растворах и расплавах электролитов (солей, кислот, щелочей), ионов и электронов в газах, при падении заряженных капель дождя, при движении заряженного эбонитового стержня и т. д.



Рис. 1.3

Электрический ток имеет определённое направление. *За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.* Поэтому если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц.

**СИЛА ТОКА.** Электрический ток в проводнике характеризуется физической величиной — *силой тока.*

**Силой тока называют скалярную физическую величину, равную отношению заряда  $\Delta q$ , переносимого через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ , к величине этого промежутка.**

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

Формула (1) выражает среднее за промежуток времени  $\Delta t$  значение силы тока. Если за любые равные промежутки времени через любое поперечное сечение проводника проходят одинаковые заряды, т. е. если сила тока и его направление не изменяются с течением времени, то электрический ток называют *постоянным*. Сила постоянного тока численно равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за 1 с:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Силу тока удобно иногда считать положительной или отрицательной величиной в зависимости от выбора положительного направления вдоль проводника. Если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением, то  $I > 0$ , в противном случае  $I < 0$ . Часто под силой тока понимают её абсолютное значение, дополнительно указывая направление тока.

В СИ единица силы тока *ампер* (А) является основной. Её устанавливают на основе магнитного взаимодействия двух проводников с токами. Согласно формуле (1) можно записать:  $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл}/1 \text{ с}$ .

**УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.** Рассмотрим условия, которые необходимы для возникновения и существования электрического тока.

1. Наличие свободных заряженных частиц (носителей заряда). Таковыми носителями заряда в металлах и полупроводниках являются электроны, в растворах электролитов — положительные и отрицательные ионы, в газах — электроны и ионы.

2. Наличие силы, действующей на заряженные частицы (носители заряда) в определённом направлении. На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Обычно именно электрическое поле внутри проводника является причиной, вызывающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц.

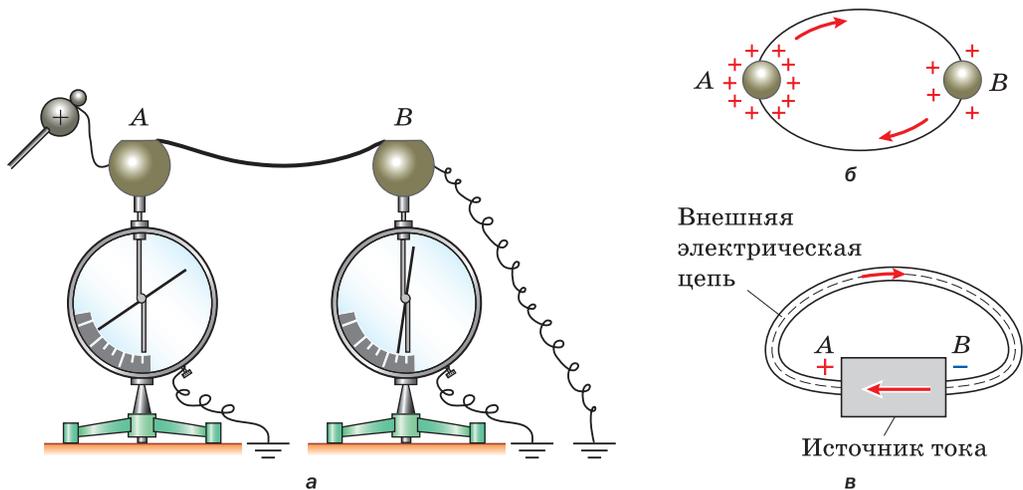


Рис. 1.4

Только в статическом случае, когда заряды покоятся, электрическое поле внутри проводника отсутствует.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника существует разность потенциалов (напряжение). Если она не изменяется с течением времени, то в проводнике устанавливается постоянный ток.

Для того чтобы ток существовал непрерывно в проводнике  $AB$  (рис. 1.4), необходимо поддерживать на его концах разные потенциалы. Это можно осуществить разными способами. Например, можно было бы непрерывно заряжать тело  $A$  и разряжать тело  $B$ . Можно заряжать тело  $A$  от электрофорной машины, а тело  $B$  заземлить (рис. 1.4, а). Но можно поддерживать непрерывный ток в проводнике, перенося обратно заряды с тела  $B$  на тело  $A$  по другому проводнику, образуя для этого замкнутую цепь (рис. 1.4, б).

Однако под действием сил этого же электрического поля такой перенос зарядов невозможен, так как потенциал тела  $B$  меньше потенциала тела  $A$ . Перенос зарядов с тела  $B$  на тело  $A$  может быть совершён только с помощью сил неэлектрического происхождения — *сторонних сил*.

**Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением электростатических (кулоновских) сил, называют сторонними силами.**

Наличие таких сил обеспечивает источник тока, включаемый в электрическую цепь. Силы, действующие в источнике тока, переносят заряд от тела с меньшим потенциалом к телу с большим потенциалом, т. е. *источник тока обладает энергией*. Источниками тока являются элек-

трические машины, гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы и др. Ряд соединённых между собой проводников вместе с источником тока составляют замкнутую электрическую цепь.

На рисунке 1.4, в приведена схема электрической цепи, в которой находится источник тока. Клеммы  $A$  и  $B$  источника имеют избыточные заряды — положительный и отрицательный. На внешнем участке цепи положительные заряды движутся под действием сил электрического поля от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. На внутреннем участке цепи  $BA$  перенос зарядов от  $B$  к  $A$  осуществляется сторонними силами, действующими в источнике тока.

Каким образом возникает электрическое поле внутри проводника при наличии источника тока? Когда проводник присоединяют к клеммам источника, свободные заряды проводника, находящиеся вблизи клемм, смещаются и действуют своим электрическим полем на соседние заряды. Со скоростью, близкой к скорости света, это взаимодействие передаётся по всей цепи, в результате чего вдоль поверхности проводника появляются заряды, создающие внутри него электрическое поле, обеспечивающее существование постоянного тока. Это поле потенциально, как и электростатическое поле.

**\* СКОРОСТЬ УПОРЯДОЧЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ.** Рассмотрим, как связана сила тока в однородном проводнике с величинами, характеризующими движение заряженных частиц. Выделим в среде, в которой существует электрический ток, очень малый объём в форме прямого цилиндра с площадью поперечного сечения  $S$  (рис. 1.5). Цилиндр ориентирован так, что его основания перпендикулярны скорости упорядоченного движения частиц  $\vec{v}$ . Под *скоростью упорядоченного движения частиц*\* в малом объёме  $\Delta V$  (но содержащем много частиц) мы понимаем отношение геометрической суммы скоростей частиц к числу их в этом объёме:

$$\vec{v} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{v}_i}{N}.$$

Средняя скорость хаотически движущихся частиц равна нулю.

Пусть высота цилиндра равна пути  $v\Delta t$ , проходимому частицами за время  $\Delta t$ . Здесь  $v$  — модуль скорости упорядоченного движения частиц.

Тогда все заряженные частицы, находящиеся внутри цилиндра, за время  $\Delta t$  пересекут сечение цилиндра с площадью  $S$ . Если концентрация заряженных частиц в среде  $n$ , то за время  $\Delta t$  через сечение с площадью  $S$  будет перенесён заряд

$$\Delta q = q_0 n v \Delta t S,$$

где  $q_0$  — заряд отдельной частицы.

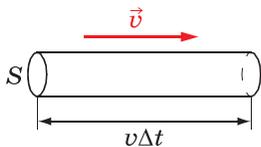


Рис. 1.5

\* Эту скорость также называют *скоростью дрейфа частиц*.

Используя формулу (1), найдём силу тока в проводнике:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = q_0 n v S. \quad (2)$$

Таким образом, сила тока в проводнике прямо пропорциональна модулю заряда, переносимого каждой частицей, концентрации частиц, модулю скорости их упорядоченного движения и площади поперечного сечения проводника.

Из формулы (2) следует, что скорость упорядоченного движения частиц в проводнике равна

$$v = \frac{I}{q_0 n S}.$$

Для металлического проводника заряд  $q_0$ , переносимый каждой частицей, — это заряд электрона:  $q_0 = e$ . Следовательно,

$$v = \frac{I}{enS}.$$

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике достаточно мала. Расчёты показывают, что в медном проводнике, площадь поперечного сечения которого равна  $1 \text{ мм}^2$ , при силе тока  $10 \text{ А}$  эта скорость составляет примерно  $7 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ . Она в сотни миллионов раз меньше средней скорости их теплового движения. \*



**1.** Приведите примеры действий электрического тока. **2.** Что представляет собой электрический ток? **3.** Что называют силой тока? **4.** Какие условия необходимы для возникновения и существования электрического тока? **5.** От каких физических величин зависит скорость упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике?



**1.** Электроны в металлах движутся под действием электрического поля, напряжённость которого равна  $\vec{E}$ . При этом оно действует на электроны с силой  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Почему же электроны не движутся равноускоренно?

**2.** В проводнике переменного сечения ( $S_1 > S_2$ ) протекает электрический ток. Сила тока равна  $I$ . Одинакова ли напряжённость электрического поля на участках проводника 1—2 и 2—3 (рис. 1.6)? Одинакова ли сила тока на этих участках?

**3.** Почему, наступая на трамвайный рельс, по которому течёт ток, мы не подвергаем себя опасности поражения током?

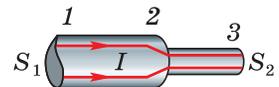


Рис. 1.6



### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сила тока в однородном металлическом проводнике изменяется по закону  $I = kt$ , где коэффициент пропорциональности  $k = 10$  А/с. Определите модуль заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, в интервале времени от 2 до 5 с.

**Дано:**

$$I = kt$$

$$k = 10 \text{ А/с}$$

$$t_1 = 2 \text{ с}$$

$$t_2 = 5 \text{ с}$$

$$q = ?$$

**Решение:**

Построим график зависимости силы тока  $I$  от времени  $t$ . Поскольку зависимость  $I(t)$  линейная и  $I(0) = 0$ , графиком является прямая, выходящая из начала координат (рис. 1.7)

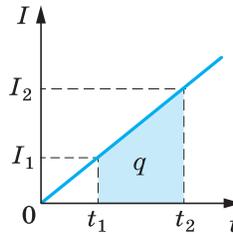


Рис. 1.7

Площадь фигуры под графиком (в данном случае трапеции) численно равна модулю заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника.

$$q = \frac{I_1 + I_2}{2} (t_2 - t_1) = \frac{kt_1 + kt_2}{2} (t_2 - t_1) = k \frac{t_2^2 - t_1^2}{2}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$q = 10 \cdot \frac{5^2 - 2^2}{2} \text{ Кл} = 105 \text{ Кл}.$$

**Ответ:**  $q = 105$  Кл.



### УПРАЖНЕНИЯ

1. Определите силу тока в проводнике, если через его поперечное сечение за 10 с проходит  $2 \cdot 10^{20}$  свободных электронов.
2. Сила тока в лампочке карманного фонаря равна 0,32 А. Сколько электронов пройдёт через поперечное сечение нити накала за 0,1 с?
3. В электрическую цепь последовательно включены источник тока, амперметр, электрическая лампа и ключ. За 20 с через поперечное сечение нити накала лампы проходит заряд, модуль которого равен 6 Кл. Какую силу тока покажет амперметр?
4. Найдите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в однородном металлическом проводе площадью поперечного сечения  $5 \text{ мм}^2$  при силе тока в нём 10 А. Концентрация свободных электронов проводимости составляет  $5 \cdot 10^{22} \text{ мм}^{-3}$ .

## § 2

### ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ.** В § 1 было показано, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов\* ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) на его концах. Она определяет силу тока  $I$  в проводнике:

$$I = f(\varphi_1 - \varphi_2).$$

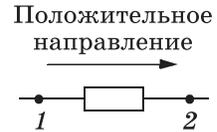


Рис. 1.8

Эту функциональную зависимость называют *вольт-амперной характеристикой* проводника. Её установление играет первоочередную роль при изучении явлений, связанных с протеканием электрического тока.

Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлического проводника. На рисунке 1.8 изображён участок электрической цепи 1—2. Условимся считать положительным направление слева направо. Тогда напряжение  $U$  (разность потенциалов) на рассматриваемом участке равно  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ , где  $\varphi_1$  — потенциал в точке 1 (в начале участка);  $\varphi_2$  — потенциал в точке 2 (в конце участка). Если  $\varphi_1 > \varphi_2$ , то  $U > 0$  и ток течёт в направлении от точки 1 к точке 2, так как в эту сторону направлены линии напряжённости электрического поля внутри проводника (при этом  $I > 0$ ). Немецкий физик Георг Ом (1787—1854) экспериментально установил прямую пропорциональную зависимость между силой тока в однородном металлическом проводнике и напряжением на его концах:

$$I \sim U. \quad (1)$$

Зависимость (1) можно записать в виде равенства

$$I = GU. \quad (2)$$

Это равенство называют *законом Ома для участка цепи*. В формуле (2)  $G$  — коэффициент пропорциональности (*проводимость проводника*), значение которого не зависит от напряжения между концами проводника и от силы тока в нём. Проводимость про-



Г. ОМ

\* Напомним, что *разность потенциалов* между двумя точками поля — это скалярная физическая величина, равная отношению работы сил электростатического поля при перемещении пробного заряда из начальной точки в конечную, к этому заряду.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

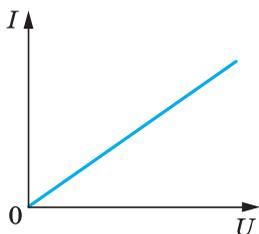


Рис. 1.9

водника зависит от материала, из которого он изготовлен, и его температуры.

Закон Ома можно сформулировать следующим образом.

**Сила тока в проводнике прямо пропорциональна проводимости проводника и напряжению (разности потенциалов) на его концах.**

На рисунке 1.9 приведена вольт-амперная характеристика однородного металлического проводника при постоянной температуре. Из графика видно, что при данных условиях сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на его концах.

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА.** Физическую величину, обратную проводимости проводника  $R = \frac{1}{G}$ , называют *электрическим сопротивлением* или просто *сопротивлением*. Следовательно, сопротивление также является характеристикой проводника. Если проводимость  $G$  проводника выразить через его сопротивление  $G = \frac{1}{R}$ , то формула (2) примет вид

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3)$$

Равенство (3) представляет собой другую форму записи закона Ома для участка цепи.

**Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка.**

Подчеркнём, что закон Ома в форме (2) или (3) справедлив только для участка цепи, в котором нет источника тока. Закон Ома для участка цепи выполняется в широких пределах для металлов и их сплавов, практически для любых постоянных напряжений, при применении которых проводник не плавится. Менее широки рамки применения закона Ома для растворов (и расплавов) электролитов и сильно ионизированных газов (плазмы). При больших напряжениях он не выполняется.

Закон Ома для участка цепи позволяет ввести новую электрическую характеристику проводника — сопротивление. Сопротивление проводника представляет собой как бы меру противодействия проводника установлению в нём электрического тока. Сопротивление проводника можно определить с помощью формулы (3):

$$R = \frac{U}{I}.$$

Единицей сопротивления в СИ является *ом* (Ом). 1 Ом — *сопротивление проводника, в котором при напряжении на его концах в 1 В сила тока в нём равна 1 А\**.

Термин «сопротивление» употребляют в двух смыслах. Во-первых, электрическое сопротивление — это величина, определяющая силу тока в проводнике при заданном напряжении на его концах. В этом смысле, например, говорят: «Лампа накаливания обладает сопротивлением 400 Ом» или «Провод имеет сопротивление 0,5 Ом». Во-вторых, *резистором* (или сопротивлением) называют устройство, предназначенное для включения в электрическую цепь с целью регулирования, уменьшения или ограничения тока в цепи. В качестве такого устройства может использоваться *реостат* для регулирования силы тока в цепи путём изменения сопротивления. Резисторы применяют в радиоприёмниках, телевизорах и других устройствах.

**УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА.** Сопротивление зависит от материала, из которого изготовлен проводник, и от его геометрических размеров. Опыт показывает, что при неизменной температуре сопротивление  $R$  однородного металлического проводника постоянного сечения прямо пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади  $S$  поперечного сечения проводника:

$$R \sim \frac{l}{S}. \quad (4)$$

Введём коэффициент пропорциональности и запишем зависимость (4) в виде равенства

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности  $\rho$  численно равен сопротивлению проводника единичной длины и единичного поперечного сечения и называется *удельным сопротивлением проводника*. Удельное сопротивление зависит от рода вещества и его состояния (в первую очередь от температуры). Из формулы (5) следует:

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Единицей удельного сопротивления в СИ является *ом · метр*.

$$\frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

1 Ом · м равен удельному сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup> и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом.

\* На практике применяют кратные и дольные единицы сопротивления, например *мегаом* (МОм), *килоом* (кОм), *миллиом* (мОм): 1 МОм = 10<sup>6</sup> Ом; 1 кОм = 10<sup>3</sup> Ом; 1 мОм = 10<sup>-3</sup> Ом.

**ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.** Изменение температуры проводника приводит к изменению его сопротивления. С одной стороны, повышение температуры проводника вызывает увеличение числа столкновений упорядоченно движущихся заряженных частиц с частицами, составляющими проводник. В результате уменьшается средняя скорость направленного движения заряженных частиц и соответственно уменьшается сила тока. Следовательно, при повышении температуры сопротивление проводника может увеличиться.

С другой стороны, повышение температуры может привести к увеличению числа свободных заряженных частиц проводника в единице объёма (например, числа ионов раствора электролита). Это приводит к увеличению силы тока в проводнике. Иначе говоря, повышение температуры проводника может привести и к уменьшению его сопротивления.

В зависимости от преобладания одного или другого фактора с увеличением температуры сопротивление проводника может или увеличиваться (металлы), или уменьшаться (растворы электролитов, уголь), или оставаться практически неизменным (специальные сплавы).

Если при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  сопротивление проводника  $R_0$ , а при температуре  $t$  оно равно  $R$ , то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, с большой степенью точности можно считать пропорциональным изменению температуры  $\Delta t$ :

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha \Delta t. \quad (6)$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  называют *температурным коэффициентом сопротивления*. Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры. В СИ температурный коэффициент сопротивления — *кельвин в минус первой степени* ( $\text{K}^{-1}$ ). Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при его нагревании на  $1\text{ K}$ . Для всех металлических проводников  $\alpha > 0$  и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры небольшой, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур. У чистых (не имеющих примесей) металлов

$$\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}.$$

У растворов электролитов  $\alpha < 0$ , так как с ростом температуры их сопротивление уменьшается.

Зависимость удельного сопротивления от температуры можно установить, если в формулу (6) подставить значения  $R = \rho \frac{l}{S}$  и  $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$ . После математических преобразований найдём:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta t).$$

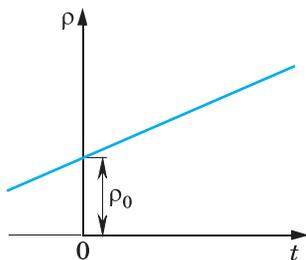


Рис. 1.10

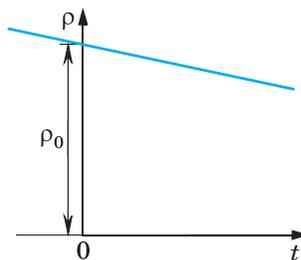


Рис. 1.11

Таким образом, *удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры*. На рисунке 1.10 эта зависимость изображена для металлических проводников, а на рисунке 1.11 — для растворов электролитов.



**1.** Какой физический смысл имеет проводимость проводника? **2.** Что характеризует сопротивление проводника? **3.** Приведите различные формулировки и формы записи закона Ома для участка цепи. **4.** При каких условиях выполняется закон Ома? **5.** Что называют удельным сопротивлением проводника? **6.** Как зависит сопротивление проводника от температуры?



**1.** Длину проволоки при её вытягивании увеличили в 2 раза. Как изменилось при этом её сопротивление?  
**2.** Почему птицы могут безопасно усаживаться на провода, находящиеся под высоким напряжением?



### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Чему равна длина нихромовой проволоки в резисторе, если при включении его в сеть с напряжением 120 В сила тока в нём равна 2,4 А? Площадь поперечного сечения проволоки равна 0,55 мм<sup>2</sup>.

**Дано:**

$$U = 120 \text{ В}$$

$$I = 2,4 \text{ А}$$

$$S = 0,55 \text{ мм}^2$$

$$\rho = 110 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$l = ?$$

**СИ:**

$$0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

**Решение:**

Согласно закону Ома для участка цепи

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Для определения сопротивления нихромовой про-

волоки в резисторе используем соотношение

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (2)$$