



§ 22.

Электрическое сопротивление. Закон Ома для участка электрической цепи

От чего зависит сила тока, протекающего в проводнике? Почему сила тока в сварочном аппарате в десятки миллионов раз больше, чем в электронных часах?

Для ответа на эти вопросы проведем ряд несложных опытов. Подключим небольшой кусочек спирали к источнику тока, выходное напряжение между клеммами которого можно регулировать. С помощью последовательно включенного амперметра и параллельно спирали включенного вольтметра (рис. 145) будем измерять силу тока и напряжение на спирали. Установим напряжение на спирали $U_1 = 2$ В. Замкнем ключ и измерим силу тока. Она оказалась $I_1 = 0,4$ А (рис. 145). Увеличим напряжение на спирали в 2 раза (рис. 146), т. е. $U_2 = 4$ В, затем в 3 раза, т. е. $U_3 = 6$ В. Показания амперметра тоже увеличатся: $I_2 = 0,8$ А (рис. 146), $I_3 = 1,2$ А.

Опыт можно продолжать дальше. Но уже из этих данных следует, что *сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на проводнике*.

Подключим теперь к источнику тока другую спираль, например спираль осветительной лампы. Мы видим, что при напряжении $U = 2$ В сила тока в спирали лампы $I = 4$ мА (рис. 147), что в сто раз меньше, чем в предыдущей спирали. Значит, спираль

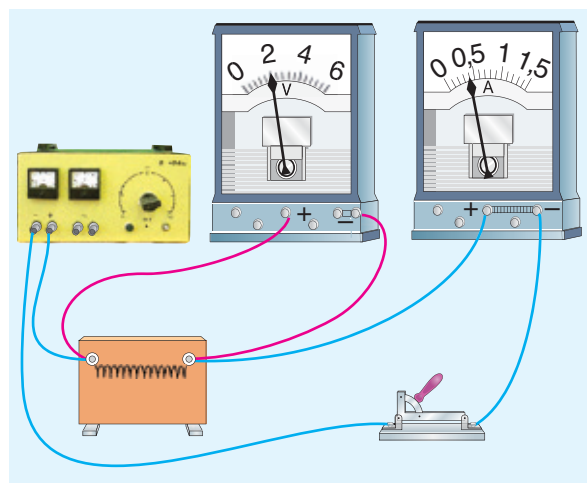


Рис. 145

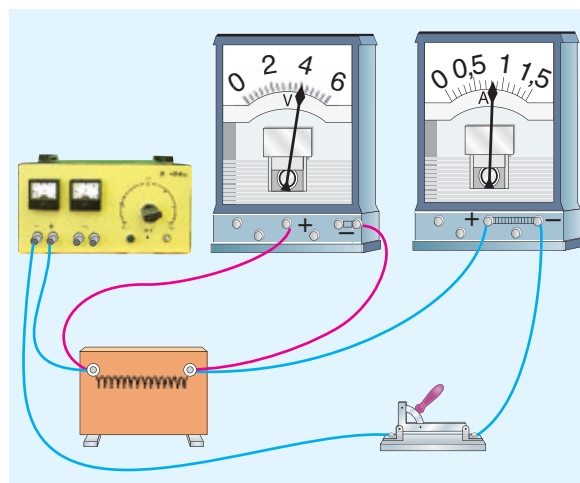


Рис. 146

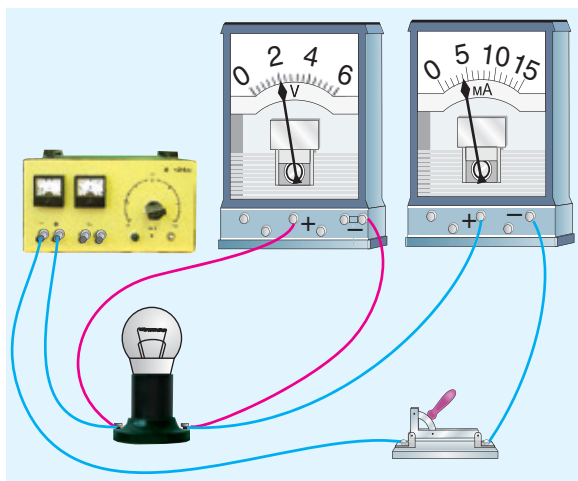


Рис. 147

лампы оказывает в 100 раз большее противодействие направленному движению заряженных частиц. То есть она обладает в 100 раз большим сопротивлением.

Эту новую величину — **электрическое сопротивление** — мы будем приписывать всякому проводнику и обозначать буквой R (по первой букве латинского слова *resisto* — сопротивляюсь). Тогда можно утверждать: *чем больше сопротивление проводника, тем меньше сила тока в нем* (обратно пропорциональная зависимость).

Итак, из опытов следует: **сила тока в проводнике (участке цепи) прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника (участка цепи).**

Данное утверждение называется **законом Ома для участка цепи** в честь немецкого ученого Г. С. Ома (см. форзац 2), установившего закон в 1826 г. Математически закон Ома можно записать так:

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

Закон Ома можно представить графически. На рисунке 148 представлен такой график для спирали, использованной в первом опыте (рис. 145). График подтверждает прямую пропорциональную зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения. График зависимости силы тока от напряжения называется **вольт-амперной характеристикой** проводника. Проводники, имеющие значительное сопротивление, принято называть **резисторами**.

В соединительных проводах противодействие движению электрических зарядов, как правило, незначительно, что позволяет *пренебречь сопротивлением соединительных проводов при решении большинства задач*.

Определенным сопротивлением обладают и измерительные приборы. При включении последовательно в цепь амперметра его сопротивление добавляется к полному сопротивлению цепи. Это вызывает нежелательное уменьшение силы тока в цепи. Чтобы этого не случилось, сопротивление амперметра должно быть мало. Идеальным был бы

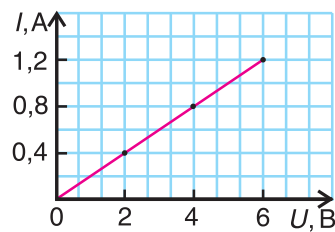


Рис. 148

амперметр без сопротивления ($R = 0$). Наоборот, добавление вольтметра параллельно некоторому прибору (резистору на рисунке 140) создает току еще один «обходной» путь. Это также резко изменяет параметры цепи. Чтобы избежать этих нежелательных последствий, надо применять вольтметры с максимально большим сопротивлением.

И еще об очень важном. При слишком малом сопротивлении цепи сила тока в ней согласно закону Ома может принять недопустимо большое значение. При замыкании цепи, изображенной на рисунке 149, ток в ней пойдет, фактически не испытывая сопротивления. Это — **короткое замыкание** цепи. В таком режиме могут быть испорчены и амперметр, и источник тока, а перегрев проводов может привести к пожару.

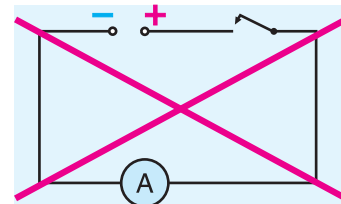


Рис. 149

■ Главные выводы

1. Сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.
2. Чем меньше сопротивление амперметра и чем больше сопротивление вольтметра, тем меньшие изменения вызывают они при подключении в цепь.
3. Вольт-амперная характеристика проводника представляет собой график зависимости силы тока в нем от напряжения.
4. Использование цепей без нагрузки приводит к недопустимо опасному росту силы тока (короткому замыканию).

? Контрольные вопросы

1. Связь между какими физическими величинами устанавливает закон Ома для участка цепи?
2. Как понимать выражение: «Сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению»?
3. Может ли в проводнике протекать ток: а) очень большой силы при малом напряжении; б) малой силы при большом напряжении?
4. Что такое короткое замыкание цепи?
5. В чем опасность короткого замыкания цепи?



§ 23.

Единица сопротивления. Расчет сопротивления

Мы ввели новую характеристику — сопротивление. Но почему проводник «сопротивляется» направленному движению заряженных частиц? В каких единицах измеряется сопротивление проводника? Можно ли его рассчитывать?

Сила тока в проводнике не может иметь любое, сколь угодно большое, значение. Причиной этого являются непрерывные столкновения электронов и ионов с частицами проводника, находящимися в узлах его кристаллической решетки. Это приводит к снижению скорости направленного движения носителей заряда, уменьшает переносимый заряд, а значит, уменьшает и силу тока. Именно эти столкновения и вызывают нагревание проводника. Так электрический ток проявляет тепловое действие.

Выразив сопротивление из закона Ома $R = \frac{U}{I}$, введем основную единицу сопротивления — 1 Ом (в честь Г. Ома):

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

1 Ом — это сопротивление проводника, в котором при напряжении 1 В проходит ток силой 1 А.

1 Ом — небольшое сопротивление. У ряда потребителей оно составляет сотни омов, поэтому сопротивление часто выражают в килоомах (кОм) и мегаомах (МОм):

$$1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом} = 1 \cdot 10^3 \text{ Ом}; \quad 1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом} = 1 \cdot 10^6 \text{ Ом}.$$

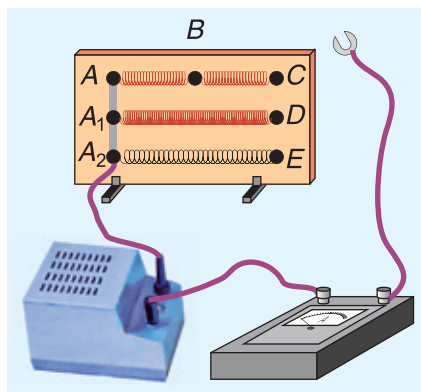


Рис. 150

Определить сопротивление проводника можно, измерив напряжение U на нем и силу тока I в нем, по формуле $R = \frac{U}{I}$. Но существует и специальный прибор для измерения сопротивления — **омметр**. С простейшим омметром вы сможете познакомиться в упражнении к этому параграфу.

Получим формулу для расчета сопротивления. Для этого используем цепь из источника тока, амперметра и панели с исследуемыми проводниками (рис. 150). На панели укреплены три проводника из нихрома и один из железа. Проводник AC

из нихрома имеет отвод от середины (клемма B , рис. 150). Два других нихромовых проводника сложены вместе и включены между точками A_1 и D (рис. 150). Все четыре проводника имеют равные длину и площадь поперечного сечения. Включим в цепь сначала целый проводник AC (цепь замыкается в точке C), а затем половину этого проводника (контакт переносится в точку B). Мы видим, что сила тока увеличивается вдвое. Значит, сопротивление уменьшается в 2 раза. Иначе говоря, *сопротивление проводника прямо пропорционально его длине*.

Подключим в цепь поочередно один проводник AC , а затем два сложенных вместе A_1D . Два проводника можно рассматривать как один, но с удвоенным поперечным сечением. Сила тока в одном проводнике AC в 2 раза меньше, чем в сложенных проводниках A_1D . Следовательно, *сопротивление проводника обратно пропорционально площади его поперечного сечения*.

Сравним теперь силы тока в проводниках одинаковых размеров, но из различных веществ: из нихрома (AC) и из железа (A_2E). Оказывается, что сила тока в железном проводнике примерно в 10 раз больше, а сопротивление в 10 раз меньше, чем в нихромовом. Значит, *сопротивление проводника зависит еще и от рода вещества, из которого изготовлен проводник*.

Из результатов опытов следует формула для расчета сопротивления проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Сопротивление проводника прямо пропорционально длине проводника и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.

Коэффициент ρ называют **удельным сопротивлением вещества**. Это характеристика не конкретного рассматриваемого проводника, а вещества, из которого он изготовлен. В СИ основной единицей удельного сопротивления $\rho = \frac{RS}{l}$ является Ом $\cdot$ м. Так как на практике длину проводников измеряют обычно в метрах, а площадь поперечного сечения в квадратных миллиметрах, то удельное сопротивление удобно записывать в $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Значения удельного сопротивления для различных веществ представлены в таблице 6. Смысл приведенных в таблице удельных сопротивлений прост. Если для нихрома значение $\rho = 1,1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, то это означает, что нихромовый проводник длиной 1 м и поперечным сечением 1 мм² обладает сопротивлением 1,1 Ом.

**Таблица 6. Удельное электрическое сопротивление
некоторых веществ (при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)**

Вещество	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Вещество	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,016	Манганин (сплав)	0,43
Медь	0,017	Константан (сплав)	0,50
Золото	0,024	Ртуть	0,96
Алюминий	0,028	Нихром (сплав)	1,1
Вольфрам	0,055	Фехраль (сплав)	1,3
Железо	0,10	Графит	13
Свинец	0,21	Фарфор	$1 \cdot 10^{19}$
Никелин (сплав)	0,40	Эбонит	$1 \cdot 10^{20}$

Обратите внимание на малые значения удельного сопротивления применяемых для электропроводки металлов: алюминия и меди.

▼ Для любознательных

Сенсацией начала XX в. было открытие сверхпроводимости. При очень сильном охлаждении (примерно до $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$) сопротивление некоторых металлов снижалось до нуля. Сверхпроводящие металлы не нагреваются даже при большой силе тока в них. В настоящее время найдены вещества, сверхпроводимость которых достигается при значительно меньшем охлаждении. Сверхпроводящие материалы в настоящее время используются в медицине и ускорителях частиц. Данной тематикой успешно занимаются группы исследователей из Института ядерных проблем Белорусского государственного университета и Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси.

■ Главные выводы

1. Электрическое сопротивление характеризует свойство проводника оказывать противодействие направленному движению заряженных частиц.
2. Причиной возникновения сопротивления являются непрерывные столкновения заряженных частиц с частицами вещества проводника.
3. Сопротивление проводника зависит от рода вещества и геометрических размеров проводника (длины, площади поперечного сечения).
4. Основной единицей сопротивления в СИ является 1 Ом.

? Контрольные вопросы

1. Что ограничивает значение силы тока в проводнике?
2. Что принято в СИ за основную единицу сопротивления?
3. Как зависит сопротивление проводника от его геометрических размеров?
4. Что показывает удельное сопротивление вещества?
5. Как понимать выражение: «Удельное сопротивление свинца равно $\rho = 0,21 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ »?
6. Почему медь не используется для изготовления спиралей в электрообогревателях?



Примеры решения задач

1. Выразите в основных единицах СИ удельное сопротивление свинца $\rho = 0,21 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Решение. Заданное значение $\rho = 0,21 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ указывает, что свинцовый проводник длиной $l = 1,0$ м и площадью поперечного сечения $S = 1,0 \text{ мм}^2$ имеет сопротивление $R = 0,21 \text{ Ом}$. Выразим это значение в основных единицах СИ:

$$\begin{aligned} \rho &= 0,21 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} = \\ &= 0,21 \frac{\text{Ом} \cdot 0,000001 \text{ м}^2}{\text{м}} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Значение $\rho = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ означает, что проводник длиной $l = 1,0$ м и площадью поперечного сечения $S = 1,0 \text{ м}^2$ имеет сопротивление $R = 0,21 \text{ мОм}$.

Ответ закономерен: проводник, сечение которого $S = 1,0 \text{ м}^2$ в миллион раз больше сечения $S = 1,0 \text{ мм}^2$, должен иметь сопротивление в миллион раз меньше.

2. При подключении к источнику с напряжением $U = 4,5 \text{ В}$ никелинового проводника поперечным сечением $S = 0,20 \text{ мм}^2$ по нему прошел ток силой $I = 300 \text{ мА}$. Какова длина проводника?