

Возвращаясь к рис. 2.2, мы можем сказать, что уменьшение заряда тела A на dq происходит как за счет уноса некоторого количества положительных зарядов dq_{\rightarrow}^{+} вдоль направления тока по проводнику в землю, так и за счет перехода некоторого количества отрицательных зарядов dq_{\leftarrow}^{-} из земли по проводнику к телу A против направления тока. В общем случае dq будет представлять собой арифметическую сумму двух количеств $dq = dq_{\rightarrow}^{+} + dq_{\leftarrow}^{-}$ и

$$i = \frac{dq_{\rightarrow}^{+} + dq_{\leftarrow}^{-}}{dt}. \quad (14.2)$$

§ 15. Закон Ома для участка цепи. Сопrotивление проводников

Рассмотрим отрезок однородного цилиндрического проводника длиной l (рис. 2.3). Для того чтобы в этом проводнике шел постоянный ток I , необходимо внутри проводника поддерживать постоянное электрическое поле E . Так как напряженность электрического поля равна градиенту потенциала, взятого с обратным знаком (см. § 8), то

$$E = -\frac{d\varphi}{dl} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l}, \quad (15.1)$$



Рис 2.3.

где φ_1 и φ_2 — электрические потенциалы в начальном и конечном сечении проводника, а

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (15.2)$$

— падение потенциала на выделенном нами участке электрической цепи 1—2, называемое напряжением, приложенным к проводнику.

При изменении напряжения U меняется и ток I , текущий в проводнике. В 1826 г. Ом экспериментально установил прямую пропорциональность между током и напряжением:

$$I \sim U.$$

Обозначим коэффициент пропорциональности, характеризующий электрическую проводимость проводника, через G ; величина R , обратная проводимости проводника, $R = 1/G$ называется его электрическим сопротивлением; тогда

$$I = GU = \frac{1}{R} U. \quad (15.3)$$

Сопротивления разных проводников численно различны. На рис. 2.4 приведены экспериментальные графики 1 и 2 закона Ома (15.3) для двух проводников с различными сопротивлениями. Уравнение (15.3) определяет соотношение между током и напряжением для конечного участка цепи и поэтому иногда называется законом Ома в интегральной форме: ток, идущий в проводнике, численно равен отношению приложенного напряжения к сопротивлению проводника.

Закон Ома в интегральной форме позволяет определить единицы сопротивления проводника: если $U=1$ и $I=1$, то $R=1$. В системе СИ единицей сопротивления является о.м. Это — сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 в идет ток в 1 а:

$$1 \text{ ом} = \frac{1 \text{ в}}{1 \text{ а}} = \frac{1}{300} \frac{\text{СГС ед. напряжения}}{3 \cdot 10^9 \text{ СГС ед. тока}} = \\ = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \text{ СГС ед. сопротивления.}$$

Сопротивление проводника R зависит от его геометрических размеров и формы, а также материала, из которого сделан проводник. Для цилиндрических проводников сопротивление прямо пропорционально их длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (15.4)$$

Коэффициент пропорциональности ρ называется удельным сопротивлением вещества, из которого сделан проводник. Из соотношения $\rho = \frac{RS}{l}$ определяются размерность и единицы измерения удельного сопротивления.

В системе СГС ток имеет размерность $[I] = \frac{[q]}{[t]} = \text{э}^{1/2} \cdot \text{см}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-2}$,

а напряжение $[U] = \frac{[A]}{[q]} = \text{э}^{1/2} \cdot \text{см}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Отсюда размерность сопротивления $[R] = \frac{[U]}{[I]} = \text{сек} \cdot \text{см}^{-1}$, а удельное сопротивление $[q] = [R] \frac{[S]}{[l]} = \text{сек}$ имеет ту же размерность, что и время.

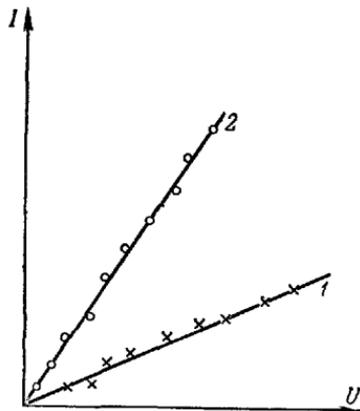


Рис. 2.4.

В системе СИ $1 \text{ ом} = 1 \text{ в}/1 \text{ а} = 1 \text{ дж}/\kappa \cdot \text{а} = 1 \text{ дж}/\text{а}^2 \cdot \text{сек}$. Если R измерять в ом , l — в м и S — в м^2 , то ρ измеряется в $\text{ом} \cdot \text{м}^2/\text{м} = \text{ом} \cdot \text{м}$, следовательно, $1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ есть удельное сопротивление вещества, цилиндрик которого длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м^2 имеет сопротивление 1 ом .

Применяемые в технике проводники имеют обычно большую длину и малое поперечное сечение. Поэтому длину проводов измеряют в м , а площадь поперечного сечения — в мм^2 . Соответственно этому удельное сопротивление измеряется в $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и численно равно сопротивлению провода длиной в 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм^2 , сделанного из данного материала:

$$1 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} = \frac{1 \text{ ом} \cdot (10^{-3} \text{ м})^2}{1 \text{ м}} = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}.$$

Наименьшими удельными сопротивлениями обладают серебро и медь. На практике электрические провода обычно изготавливаются из меди:

$$\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м} = 0,017 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

или алюминия:

$$\rho_{\text{Al}} = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м} = 0,029 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Хотя при равном сопротивлении алюминиевый провод и будет толще медного, но благодаря малому удельному весу алюминия вес его погонного метра будет меньше соответствующего веса медного провода того же сопротивления; поэтому при определенных условиях целесообразно применять алюминиевые провода.

Удельное сопротивление такого типичного изолятора, как стекло, равно $5 \cdot 10^{13} \text{ ом} \cdot \text{м}$, т. е. примерно в 10^{19} раз больше, чем у меди.

Для сравнения в таблице приведены удельные сопротивления некоторых металлов и сплавов при комнатной температуре.

Удельные сопротивления некоторых металлов и сплавов

Материал	$\rho \cdot 10^8 \text{ ом} \cdot \text{м}$	Материал	$\rho \cdot 10^8 \text{ ом} \cdot \text{м}$
Серебро	0,016	Железо	0,086
Медь	0,017	Платина	0,107
Золото	0,023	Свинец	0,210
Алюминий	0,029	Никелин	0,420
Вольфрам	0,056	Манганин	0,430
Цинк	0,060	Константан . . .	0,500
Никель	0,070	Ртуть	0,958
Латунь	0,080	Нихром	1,100

Подставляя выражение (15.4) в (15.3), преобразуем закон Ома

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l}$$

к виду

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}. \quad (15.5)$$

Величина

$$\frac{I}{S} = j \quad (15.6)$$

носит название плотности тока и на практике измеряется в а/мм². В соответствии с (15.1) $U/l = E$ есть напряженность электрического поля в проводнике.

Величина, обратная удельному сопротивлению,

$$\frac{1}{\rho} = \gamma, \quad (15.7)$$

называется удельной проводимостью или электропроводностью данного вещества. При введенных обозначениях соотношение (15.5) имеет вид

$$j = \gamma E \quad (15.8)$$

и носит название закона Ома в дифференциальной форме.

Для проводников переменного сечения (рис. 2.5) зависимость сопротивления от геометрических размеров уже не будет выражаться столь простым соотношением, как (15.4). Здесь величина тока I в любых двух сечениях проводника будет одинаковой, так как в противном случае между этими сечениями накапливался бы электрический заряд, изменялось бы электрическое поле и ток перестал бы быть постоянным. Плотность же

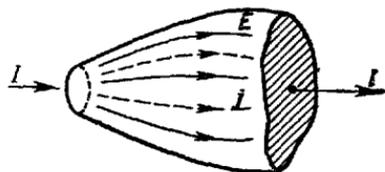


Рис 2.5

тока в различных сечениях и даже в разных точках одного и того же сечения может быть различной и по величине и по направлению. В этом случае внутри проводника будет неоднородным и электрическое поле, вектор напряженности которого E будет изменять свою величину и направление от точки к точке. Однако соотношение (15.8) между j и E остается справедливым в любой точке внутри проводника. Учитывая векторный характер величин j и E , закон Ома в дифференциальной форме (для каждого бесконечно малого участка в проводнике) должен быть записан в виде

$$j = \gamma E. \quad (15.9)$$

Сопротивление данного проводника зависит от внешних условий и в первую очередь от температуры и давления. На механизме температурной зависимости сопротивления мы остановимся несколько подробнее в последующих главах при теоретическом выводе закона Ома. Здесь же пока приведем некоторые экспериментальные данные.

Опыт показывает, что в первом приближении *сопротивление металлических проводников линейно возрастает с температурой по закону*

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t). \quad (15.10)$$

Для чистых металлов температурный коэффициент сопротивления $\alpha \approx 0,004 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ и близок к $\frac{1}{273}$. На рис. 2.6 приведен примерный график зависимости сопротивления металла от абсолютной температуры T . Как показывают теория (см. ниже, § 21) и опыт, при $T \rightarrow 0^\circ \text{ К}$ сопротивление металла стремится к нулю.

Для некоторых металлов и сплавов вблизи абсолютного нуля температуры наблюдается (при некоторой характерной для каждого из них температуре) скачкообразное падение сопротивления практически до нуля. Проводник при этом переходит в так называемое сверхпроводящее состояние. Если в замкнутом

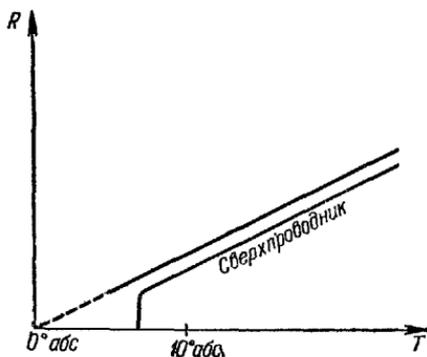


Рис. 2.6.

контуре из сверхпроводника создать электрический ток, то этот ток будет неделями течь в сверхпроводнике, практически не уменьшаясь по величине. Температуры перехода в сверхпроводящее состояние для разных металлов различны и лежат в интервале примерно от 2° К до 10° К .

Температурная зависимость сопротивления металлических проводников широко используется в технике для создания термометров сопротивления. Помещая в печь спираль известного сопротивления R_0 и измеряя ее сопротивление R_t , можно согласно (15.10) определить температуру t печи. С другой стороны, эта температурная зависимость оказывает вредное влияние на работу точных электроизмерительных приборов, меняя сопротивление последних при изменении внешних условий. Так как разница температур зимой и летом в данном месте может достигать 60° , то величина $\alpha \Delta t$ может доходить до $\sim 25\%$.

Для предотвращения вредного влияния изменения сопротивления с температурой приходится предусматривать специальные компенсационные схемы или изготавливать проводом из специальных сплавов с низким температурным коэффициентом, как, например, константана, у которого $\alpha \approx 0,002 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$, т. е. примерно в 2000 раз ниже, чем у меди.

Если к проводнику прикладывать значительные усилия, то он деформируется и несколько изменяет свои геометрические размеры и структуру. При этом в соответствии с (15.4) несколько изменяется его сопротивление. На этом принципе основаны электрические тензометры, позволяющие измерять значительные и быстро меняющиеся давления.

§ 16. Закон Ома для замкнутой цепи

При наличии в проводнике электрических полей, создаваемых электрическими зарядами, постоянный ток невозможен. Действительно, соединим, например, проводником два тела, несущих заряды противоположного знака $+q$ и $-q$. В проводнике тогда возникнет электрическое поле и потечет ток. В процессе прохождения тока оба тела будут разряжаться, разность потенциалов между ними будет падать и ток уменьшится до нуля. Таким образом, электрическое поле может создать в проводнике лишь кратковременный импульс тока.

Поскольку ток в проводнике нейтрализует помещенные на его концах заряды, то для поддержания постоянной разности потенциалов и тока необходимо все время прикладывать так называемые сторонние силы неэлектрической природы, непрерывно разделяющие электрические заряды и поддерживающие постоянство имеющих полей.

Природа таких сторонних сил может быть различна. В электрофорной машине происходит непрерывное разделение положительных и отрицательных зарядов за счет механической работы. В гальваническом элементе происходит разделение зарядов за счет энергии химической реакции. В фотоэлементе падающий свет вырывает из поверхности металла отрицательно заряженные частички — электроны. В генераторе на электростанции заряды разделяются действующими на них силами магнитного поля.

Во всех перечисленных и в ряде других случаев на отдельных участках цепи на электрические заряды действуют сторонние силы $F_{\text{стор}}$, перемещающие на этих участках заряды против направления электрического поля E . Обозначим через

$$E_{\text{стор}} = \frac{F_{\text{стор}}}{q'} \quad (16.1)$$