

Для предотвращения вредного влияния изменения сопротивления с температурой приходится предусматривать специальные компенсационные схемы или изготавливать провода из специальных сплавов с низким температурным коэффициентом, как, например, константана, у которого  $\alpha \approx 0,002 \cdot 10^{-3}$  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 постоянных разности потенциалов и тока необходимо все время прикладывать так называемые сторонние силы неэлектрической природы, непрерывно разделяющие электрические заряды и поддерживающие постоянство имеющихся полей.

Природа таких сторонних сил может быть различна. В электротормозной 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 вырывается из поверхности металла отрицательно заряженные частицы — 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  $F_{стор}$ , перемещающие на этих участках заряды против направления электрического поля  $E$ . Обозначим через

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

напряженность поля сторонних сил, т. е. силу, действующую на единичный положительный заряд ( $q' = +1$ ) в проводнике. При наличии сторонних полей закон Ома в дифференциальной форме (15.9) примет более общий вид:

$$\boxed{j = \gamma(E + E_{\text{стор}}).} \quad (16.2)$$

Перейдем от дифференциальных соотношений к интегральным. Рассмотрим замкнутую цепь, на участке  $I-2$  которой включен сторонний источник тока, например гальванический элемент, как это показано на рис. 2.7. Выделим мысленно малый элемент тока длиной  $dl$  так, чтобы на этом участке можно было считать площадь поперечного сечения проводника  $S$  постоянной, а поля и плотность тока — однородными и направленными перпендикулярно поперечному сечению проводника. Тогда (16.2) перепишется в виде

$$j = \gamma(E + E_{\text{стор}}),$$

или

$$\frac{I}{S} = \gamma \left( -\frac{d\varphi}{dl} + E_{\text{стор}} \right). \quad (16.3)$$

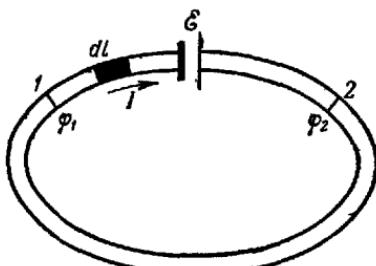


Рис. 2.7

Умножим обе части равенства (16.3) на  $q dl = dl/\gamma$  получим \*):

$$I \frac{q dl}{S} = -d\varphi + E_{\text{стор}} dl,$$

и проинтегрируем по участку проводника от 1 до 2:

$$I \int_1^2 \frac{q dl}{S} = \varphi_1 - \varphi_2 + \int_1^2 E_{\text{стор}} dl. \quad (16.4)$$

Величина  $q dl/S = dR$  представляет собой сопротивление бесконечно малого участка проводника, а

$$\boxed{\int_1^2 \frac{q dl}{S} = R_{1,2}}$$

\*) В общем случае нелинейных проводников и неоднородных полей надо брать скалярное произведение ( $j q dl$ ), в которое войдет еще косинус угла между  $j$  и  $dl$ .

— полное сопротивление всего участка цепи. Разность  $\varphi_1 - \varphi_2 = U_{1,2}$ , есть падение потенциала на данном участке. Наконец,

$$\int_1^2 E_{\text{стор}} dl = \mathcal{E} \quad (16.5)$$

носит название электродвижущей силы (э. д. с.) источника тока, включенного на этом участке; этот интеграл численно равен работе, совершающейся сторонними силами при переносе ими по цепи единицы положительного заряда.

Таким образом, (16.4) выражает собой закон Ома в интегральной форме для участка цепи, содержащего э. д. с.:

$$IR_{1,2} = U_{1,2} + \mathcal{E}. \quad (16.6)$$

Если на данном участке источник тока отсутствует ( $\mathcal{E}=0$ ), то (16.6), естественно, переходит в обычный закон Ома (15.3).

Перемещая сечение 2 все дальше вдоль проводника, мы, наконец, достигнем такого положения, когда 2 совпадает с 1. В этом случае  $\varphi_2 = \varphi_1$  и  $U_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$ , т. е. полное падение потенциала в замкнутой цепи равно нулю. При движении вдоль направления тока вне источника тока  $E_{\text{стор}} = 0$  и потенциал непрерывно падает, а внутри источника ток течет против направления электрического поля  $E$  и потенциал возрастает до своего исходного значения, как это показано на рис. 2.8. Для такой замкнутой цепи закон Ома (16.6) примет вид

$$IR_{\text{полн}} = \mathcal{E}, \quad (16.7)$$

где  $R_{\text{полн}}$  есть полное сопротивление всей цепи, а э. д. с.

$$\mathcal{E} = \oint E_{\text{стор}} dl \quad (16.8)$$

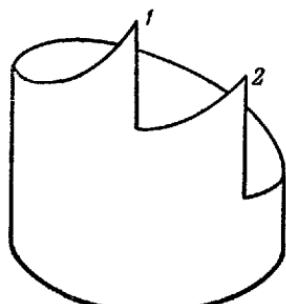


Рис. 2.8.

численно равна работе переноса единичного положительного заряда через всю цепь.

Практически могут наблюдаться случаи, когда сторонние силы сосредоточены на сравнительно узких участках цепи  $\Delta l$ , например в очень узком слое у электродов гальванического элемента. На таком малом участке  $\Delta l$  среднее значение сторонней силы  $\bar{E}_{\text{стор}}$  очень велико, так что произведение  $\bar{E}_{\text{стор}} \Delta l$  имеет конечное значение и создает почти вертикальный «скакочек» потенциала, как это изображено на рис. 2.8.

Рассмотрим пример источника тока с э. д. с.  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ , замкнутого на внешнюю цепь (потребителя)

с сопротивлением  $R$ . В цепь включены электроизмерительные приборы: амперметр  $A$ , измеряющий ток  $I$ , и вольтметр  $V$ , измеряющий напряжение  $U$  у потребителя. В качестве последнего используем реостат  $R$  переменного сопротивления (рис. 2.9). Полное сопротивление всей цепи равно сумме сопротивления источника и сопротивления потребителя:

$$R_{\text{полн}} = r + R, \quad (16.9)$$

и закон Ома для всей цепи (16.7) примет вид

$$I(R + r) = \mathcal{E}. \quad (16.10)$$

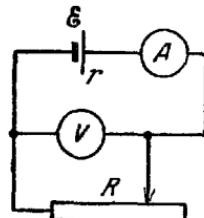


Рис. 2.9.

Поэтому ток зависит от сопротивления внешней цепи  $R$  по закону

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (16.11)$$

Поскольку на участке внешней цепи э. д. с. отсутствует, то закон Ома для этого участка (15.3) имеет вид

$$U = IR = \mathcal{E} \frac{R}{R + r} \leq \mathcal{E}. \quad (16.12)$$

Формула (16.12) дает зависимость напряжения от сопротивления нагрузки  $R$ .

В пределе, когда  $R \rightarrow 0$ , источник тока замкнут накоротко. В этом случае ток максимальен:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r} = I_{\text{макс}}, \quad (16.11a)$$

а напряжение во внешней цепи равно нулю:

$$U = 0. \quad (16.12a)$$

В противоположном предельном случае,  $R \rightarrow \infty$ , цепь разомкнута и ток отсутствует:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\infty} = 0, \quad (16.11b)$$

а напряжение максимально:

$$U = \mathcal{E} \frac{1}{1 + \frac{r}{\infty}} = \mathcal{E} \quad (16.12b)$$

и равно э. д. с. источника.

Из (16.12b) вытекает, что электродвижущая сила источника численно равна напряжению на его зажимах при разомкнутой внешней цепи.