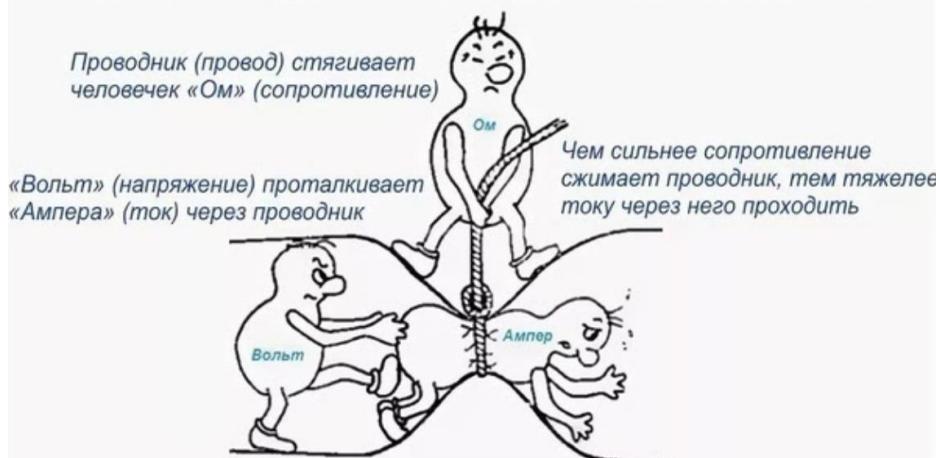


### 3 Электрическое сопротивление. Энергия и мощность источника ЭДС. Потребление энергии.

Ток в электрической цепи равен напряжению, делённому на сопротивление цепи,  $I = U / R$ . Источники ЭДС вырабатывают энергию с определённой скоростью, это называется мощностью. Мощность равна произведению ЭДС на силу тока  $E \cdot I$ . Приёмники потребляют энергию со скоростью (мощностью) равной произведению квадрата силы тока на сопротивление  $I^2 R$ .

Чем больше сопротивление проводника, тем меньше сила тока



### 3.4. Электрическое сопротивление. Закон Ома

Электрическое сопротивление – это противодействие, которое атомы и молекулы проводника оказывают направленному движению зарядов в проводнике.

В 1826 г. Георг Ом экспериментально получил формулу для определения сопротивления участка проводника:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3.2)$$

Для практических целей представляет интерес определение сопротивления участка проводника, если известны его форма и размеры.

Рассмотрим отрезок проводника длиной  $l$  и поперечным сечением  $S$  (рис. 3.3).

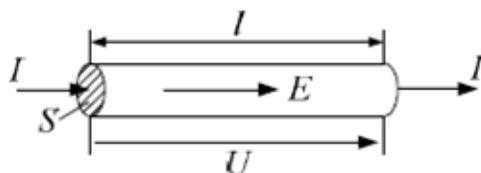


Рис. 3.3. Участок проводника с током

Наличие тока означает, что в проводнике существует электрическое поле с напряженностью  $E$ .

Электрическое поле можно принять равномерным, тогда по уравнению (1.2) напряжение на проводнике

$$U = El.$$

Плотность электрического тока в проводнике выражается произведением напряженности электрического поля  $E$  и удельной электрической проводимости  $\gamma$ :

$$J = \gamma E.$$

Удельная электрическая проводимость  $\gamma$  характеризует электропроводность вещества. В электротехнических справочниках приводятся значения удельной электрической проводимости материалов или обратной ей величины удельного сопротивления:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}.$$

Считая, что ток равномерно распределен по сечению ( $J = \text{const}$ ), и учитывая уравнения (3.1) и (3.2), можно записать выражение сопротивления проводника через его размеры:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{El}{\gamma ES} = \frac{l}{\gamma S} = \rho \frac{l}{S}.$$

Наряду с сопротивлением для расчета цепей вводят понятие *проводимости* – величины, обратной сопротивлению:

$$g = \frac{1}{R}.$$

*Единицей электрического сопротивления* является сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В устанавливается ток 1 А:  $[R] = \left[ \frac{U}{I} \right] = \text{вольт/ампер (В/А)} = \text{ом (Ом)}$ .

*Единица измерения проводимости* – 1/Ом = сименс (См).

*Единица измерения удельной проводимости* – 1/(Ом · м); *удельного сопротивления* – Ом · м.

Из уравнения (3.2) следует

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) является математическим выражением **закона Ома для участка проводника**.

**Ток в проводнике равен отношению напряжения на участке проводника к электрическому сопротивлению этого участка.**

Выражения  $U = RI$  и  $R = \frac{U}{I}$  являются производными закона

Ома для участка проводника.

Графическое изображение электрического сопротивления  $R$  представлено на рисунке 3.1, б. **Элемент цепи, обозначенный  $R$ , называют резистором** или резистивным элементом цепи, предназначенным для использования его электрического сопротивления.

Положительное направление напряжения  $U$  на резистивном элементе  $R$  совпадает по направлению с током  $I$ . Ток через резистор  $R$  идет от большего потенциала к меньшему.

Важно отметить, что линии, соединяющие резисторы и источники ЭДС в расчетных схемах (см. рис. 3.1, б), являются проводниками, но их сопротивлением пренебрегают (т. е. считают равным нулю) и учитывают при расчете цепи только сопротивления резисторов  $R$ .

В общем случае сопротивление  $R$  зависит от тока  $I$ . Металлы нагреваются при прохождении тока через них. При увеличении температуры проводника усиливается тепловое хаотическое движение частиц, что увеличивает число столкновений и затрудняет упорядоченное движение электронов.

Сопротивление полупроводников изменяется при изменении величины и направления тока.

На практике часто бывает задана не зависимость сопротивления от тока  $R(I)$  резистивного элемента, представляющего приемник на схеме, а **зависимость напряжения на резистивном элементе от тока  $U(I)$  или обратная зависимость тока от напряжения  $I(U)$** . Характеристики  $U(I)$  и  $I(U)$  получили название **вольт-амперных характеристик (ВАХ)**.

Вольт-амперные характеристики могут быть нелинейными (рис. 3.4) и линейными (рис. 3.5). Следовательно, электрические цепи, содержащие элементы с нелинейными характеристиками, называют нелинейными, а цепи, содержащие только элементы с линейными характеристиками, называют линейными.

Для нелинейных резистивных элементов характерно сопротивление, которое зависит от тока. Так, судя по ВАХ (см. рис. 3.4), сопротивление элемента 1 падает с ростом тока, а сопротивление элемента 2 растет. Режимы работы большого числа реальных электрических цепей можно отнести к линейным (см. рис. 3.5), поэтому изучение свойств и методов расчета линейных электрических цепей представляет значительный практический интерес. У линейных резистивных элементов сопротивление  $R$  неизменно, не зависит от тока; ЭДС  $E$  источников в линейных цепях также считается постоянной.

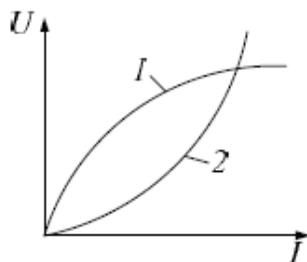


Рис. 3.4. ВАХ нелинейных элементов электрической цепи

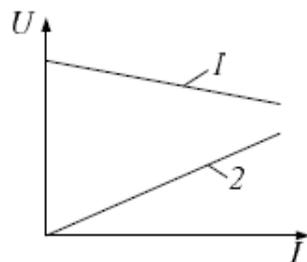


Рис. 3.5. ВАХ линейных элементов электрической цепи

**Пример 3.1.** Катушка из медной проволоки имеет  $N = 2000$  витков, средний диаметр витка  $D = 127$  мм, диаметр проволоки  $d = 2$  мм. Определить сопротивление провода катушки, если удельное сопротивление меди при  $t = 20$  °С  $\rho = 0,0175$  Ом · мм<sup>2</sup>/м.

**Решение.** Определим длину медной проволоки, умножив длину окружности среднего витка на число витков:

$$l = \pi DN = 3,14 \cdot 127 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 \approx 800 \text{ м.}$$

Сечение медного провода

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2.$$

Определим сопротивление провода катушки:

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,0175 \frac{800}{3,14} = 4,45 \text{ Ом.}$$

### 3.5. Энергия и мощность источника ЭДС

Работа сторонних сил в источнике ЭДС по переносу единичного положительного заряда равна ЭДС  $E$ . Следовательно, работа сторонних сил по перемещению всего электрического заряда  $q$ , создающего электрический ток, равна  $Eq$ .

Работа сторонних сил равна энергии, отдаваемой источником питания во внешнюю цепь. Эта энергия называется *электрической энергией источника*:

$$W_{\text{н}} = Eq.$$

Перемещенный заряд  $q$  можно выразить через ток в источнике:  $q = It$ , поэтому

$$W_{\text{н}} = EIt. \quad (3.4)$$

Формула (3.4) позволяет подсчитать энергию, выработанную источником за определенный промежуток времени  $t$ . Для оценки работоспособности источника нужно определить энергию, выработанную источником в единицу времени, т. е. за 1 с.

Энергия, вырабатываемая в единицу времени, называется *мощностью источника*:

$$P_{\text{н}} = \frac{W_{\text{н}}}{t} = \frac{EIt}{t};$$
$$P_{\text{н}} = EI. \quad (3.5)$$

Единица измерения энергии – джоуль (Дж).

Единица измерения мощности [P] =  $\left[ \frac{\text{W}}{t} \right]$  = джоуль/секунда =  
= ватт (Вт).

Из формулы (3.5) следует, что

ватт = вольт-ампер; джоуль = вольт-ампер-секунда = ватт-секунда.

Указанные единицы измерения мощности и энергии являются основными. Измерять большие мощности и количество энергии

удобнее более крупными единицами, чем ватт и джоуль. Поэтому пользуются производными единицами:

$$1 \text{ киловатт (кВт)} = 10^3 \text{ Вт}; 1 \text{ мегаватт (МВт)} = 10^6 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ киловатт-час (кВт} \cdot \text{ч)} = 1000 \cdot 3600 = 36 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{с (или Дж)}.$$

### 3.6. Преобразование электрической энергии в тепловую

Электрические заряды, движущиеся в проводнике под действием сил электрического поля, сталкиваются с элементарными частицами атомов и молекул проводника. При каждом столкновении движущиеся электрические заряды отдают энергию, при этом проводник нагревается за счет работы сил электрического поля.

Выразим количество выделенной тепловой энергии через напряжение и ток. Предположим, что в проводнике, имеющем на концах разность потенциалов  $U$ , заряд перемещенных частиц  $q = It$ .

Энергия электрического поля, затраченная на перемещение заряженных частиц,

$$W_3 = Uq = UIt.$$

Работа сил электрического поля расходуется на нагревание проводника. Поэтому энергию  $W_3$  можно считать равной тепловой энергии приемника:

$$W_n = W_3 = UIt.$$

Согласно закону Ома,  $U = IR$ , тогда

$$W_n = I^2 R t. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) является математическим выражением *закона Джоуля – Ленца*.

**Количество электрической энергии, преобразуемой в проводнике в тепловую энергию, пропорционально квадрату тока и электрическому сопротивлению проводника.**

Скорость преобразования электрической энергии в другой вид энергии в приемнике называется *мощностью приемника*:

$$P_n = \frac{W_n}{t} = UI. \quad (3.7)$$

Формула (3.7) справедлива для любого приемника независимо от вида энергии, который получается в результате преобразования.

Если электрическая энергия полностью превращается в тепловую, то **мощность приемника можно выразить через ток в проводнике и его сопротивление:**

$$P_n = I^2 R.$$

Явление преобразования в проводниках электрической энергии в тепловую широко используется на практике. На этом принципе основано действие большинства электрических промышленных и бытовых нагревательных устройств.

### 3.7. Преобразование электрической энергии в световую

Принцип преобразования электрической энергии в световую лежит также в основе работы электрических ламп накаливания. Нить лампы, изготовленная из тугоплавкого металла (вольфрама), нагревается при электрическом токе до температуры 3000 °С.

При высокой температуре нити лампы часть энергии излучается в виде световой энергии, которая в общем потоке тепловой энергии, излучаемой лампой, составляет менее 10 %.

**Пример 3.2.** Электропечь мощностью 1000 Вт при напряжении 220 В присоединена к распределительному щитку алюминиевыми проводами сечением  $S = 5 \text{ мм}^2$  и длиной 50 м (в одну сторону). Определить ток, сопротивления электропечи и соединительных проводов, мощность потерь энергии и падение напряжения в проводах.

**Решение.** Ток в электропечи

$$I = \frac{P_n}{U} = \frac{1000}{220} = 4,54 \text{ А.}$$

Сопротивление электропечи

$$R_n = \frac{U}{I} = \frac{220}{4,54} = 48,4 \text{ Ом.}$$

Сопротивление соединительных проводов (линии) при удельном сопротивлении алюминия  $\rho = 0,029 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  ( $t = 20 \text{ °С}$ )

$$R_{\text{л}} = \rho \frac{l}{S} = 0,029 \cdot 10^{-6} \frac{50 \cdot 2}{5 \cdot 10^{-6}} = 0,58 \text{ Ом.}$$

Мощность потерь энергии в соединительных проводах (линии)

$$P_{\text{л}} = I^2 R_{\text{л}} = 4,54^2 \cdot 0,58 = 11,2 \text{ Вт.}$$

Падение напряжения в проводах

$$U_{\text{л}} = IR_{\text{л}} = 4,54 \cdot 0,58 = 2,63 \text{ В.}$$

**Дополнение.**

Рассмотрим пальчиковый никель-марганцевый аккумулятор AA *Rechargeable NiMH 1600 mAh*. 1600 миллиампер-часов это его ёмкость. Рабочее напряжение 1,2 В, максимальный ток разряда 160 мА.

Энергия которую содержит аккумулятор равна  $1,6 \text{ А} \cdot \text{ч} \cdot 1,2 \text{ В} = 1,92 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ .

При тарифе на электроэнергию 0,2537 руб. за кВт·ч она стоила бы

$1,92 \cdot 0,2537 / 1000 = 0,000487$  рубля или меньше 0,05 копейки.

А аккумулятор стоит рубли, потому что его энергия дорогая.

Максимальная мощность аккумулятора  $160 \text{ мА} \cdot 1,2 \text{ В} = 0,192 \text{ Вт}$ .

Мощность розетки  $6 \text{ А} \cdot 220 \text{ В} = 1320 \text{ Вт}$ .