

§ 26. Закон Ома для полной электрической цепи. КПД источника тока

В 1826 г. немецкий физик Георг Симон Ом (1787–1854) опытным путём установил, что при постоянной температуре отношение напряжения между концами металлического проводника к силе тока в нём является величиной постоянной. На основании этого был сформулирован закон, названный законом Ома для участка электрической цепи:

$I = \frac{U}{R}$, где R — сопротивление участка цепи. От чего и как зависит сила тока в замкнутой цепи, содержащей источник тока, т. е. в полной электрической цепи?

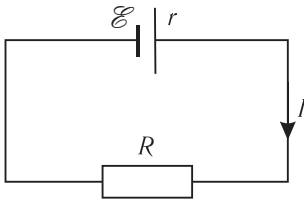


Рис. 132

Закон Ома для полной электрической цепи.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора с сопротивлением R . Известны ЭДС $\mathcal{E}$ источника тока и его сопротивление r , которое называют внутренним. Схема цепи представлена на рисунке 132. Пусть сила тока в цепи I , а напряжение между концами проводника U .

Закон Ома для полной цепи связывает силу тока I в цепи, ЭДС $\mathcal{E}$ источника тока и полное сопротивление цепи $R + r$, которое складывается из сопротивлений внешнего (резистор) и внутреннего (источник тока) участков цепи (сопротивлением соединительных проводов пренебрегаем). Эту связь можно установить теоретически на основании закона сохранения энергии.

Если через поперечное сечение проводника за промежуток времени t проходит заряд q , то работу сторонней силы по перемещению электрического заряда можно определить по формуле

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q.$$

Поскольку сила тока $I = \frac{q}{t}$, то

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}It. \quad (26.1)$$

В неподвижных проводниках неизменного химического состава в результате работы сторонних сил происходит увеличение только внутренней энергии внешнего и внутреннего участков цепи. Таким образом, при прохождении электрического тока в резисторе и источнике тока выделяется количество теплоты Q , которое можно определить по закону Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t + I^2 r t. \quad (26.2)$$

На основании закона сохранения энергии:

$$A_{\text{ст}} = Q. \quad (26.3)$$

Подставим формулы (26.1) и (26.2) в равенство (26.3) и в результате математических преобразований получим:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (26.4)$$

Произведение силы тока на сопротивление участка цепи часто называют падением напряжения на этом участке. Поэтому $IR = U$ — падение напряжения (напряжение) на внешнем участке цепи, Ir — падение напряжения на внутреннем участке цепи.

Выражая силу тока из формулы (26.4), получим:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (26.5)$$

Формула (26.5) является математическим выражением **закона Ома для полной электрической цепи**, согласно которому **сила тока в полной электрической цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи**.

От теории к практике

Аккумулятор, внутреннее сопротивление которого $r = 0,80$ Ом, подсоединён к резистору. Чему равна ЭДС аккумулятора, если напряжение на его полюсах $U = 6,0$ В, а сила тока в цепи $I = 0,50$ А?

Различные режимы работы электрической цепи. Преобразуем формулу (26.4):

$$IR = \mathcal{E} - Ir,$$

так как $IR = U$, то

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (26.6)$$

Из выражения (26.6) следует, что при разомкнутой цепи ($I = 0$) напряжение между полюсами источника тока равно его ЭДС: $U = \mathcal{E}$. Следовательно, измерить ЭДС источника тока можно, подключив к его полюсам вольтметр с бесконечно большим собственным сопротивлением (чтобы не нарушать режим разомкнутой цепи).

В случае, если сопротивление внешнего участка цепи стремится к нулю ($R \rightarrow 0$), сила тока возрастает и достигает максимального значения. Падение напряжения на источнике тока при этом равно ЭДС, а напряжение между его полюсами — нулю.

Такой режим работы источника тока называют коротким замыканием, а максимально возможную для данного источника силу тока называют силой тока короткого замыкания:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

где r — внутреннее сопротивление источника тока.

Для источников тока с незначительным внутренним сопротивлением (например, у автомобильных аккумуляторов $r \approx 0,01$ Ом) режим короткого замыкания чрезвычайно опасен, поскольку может привести к повреждению источника тока и даже быть причиной пожара.

От теории к практике

Сила тока при коротком замыкании батарейки $I_{\text{к.з}} = 2$ А. Когда к батарейке подключили резистор с сопротивлением $R = 3$ Ом, сила тока стала $I = 1$ А. Как изменилось полное сопротивление цепи? Чему равно внутреннее сопротивление батарейки?

Коэффициент полезного действия источника тока. При перемещении заряда q на внешнем участке цепи, напряжении на котором U , за промежуток времени t сила электрического поля совершает работу:

$$A = Uq.$$

Используя выражение $I = \frac{q}{t}$, получим формулу для расчёта работы электрического тока, совершённой на внешнем участке цепи:

$$A = IUt.$$



Если внешним участком цепи является нагревательный элемент (или резистор), то с учётом закона Джоуля—Ленца формула для расчёта полезной работы электрического тока на внешнем участке цепи:

$$A_{\text{полезн}} = I^2 R t.$$

Учитывая, что мощность $P = \frac{A}{t}$, получим выражение для определения полезной мощности тока на тепловом потребителе, являющемся внешним участком цепи:

$$P_{\text{полезн}} = I^2 R = IU.$$

Поскольку работа сторонних сил источника тока:

$$A_{\text{ст}} = A_{\text{полн}} = I \mathcal{E} t,$$

то мощность, развиваемая сторонними силами источника тока при наличии в цепи только нагревательного элемента:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{полн}} = I \mathcal{E} = IU + I^2 r.$$

Следовательно, $P_{\text{полн}} = P_{\text{полезн}} + I^2 r$.

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока — отношение полезной мощности тока на внешнем участке цепи к полной мощности, развиваемой сторонними силами источника тока:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100 \, \%.$$



Если внешний участок цепи — нагревательный элемент, то

$$P_{\text{полезн}} = I^2 R,$$

$$P_{\text{полн}} = I^2 (R + r).$$

Тогда КПД источника тока

$$\eta = \frac{R}{R + r} \cdot 100 \, \%.$$



Закон Ома для полной электрической цепи:
сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока
и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$

Цепь разомкнута
($R \rightarrow \infty$; $I = 0$)

$$U = \mathcal{E}$$

Напряжение
между полюсами
источника тока
равно его ЭДС

Цепь замкнута

$$U + Ir = \mathcal{E}$$

Сумма напряжения
на внешнем участке
цепи и падения
напряжения (Ir) на
внутреннем участке
цепи равна ЭДС
источника тока

*Режим короткого
замыкания*

(сопротивление
внешнего участка
цепи стремится
к нулю $R \rightarrow 0$, а
сила тока достигает
максимального для
данного источника
тока значения)

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока — отношение
полезной мощности тока на внешнем участке цепи к полной мощности,
развиваемой сторонними силами источника тока:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100 \%$$



1. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.
2. Как можно измерить ЭДС источника тока?
3. Какой режим работы электрической цепи соответствует короткому замыканию?
4. Что понимают под силой тока короткого замыкания?
5. Что понимают под полезной работой электрического тока? полной работой источника тока?
6. Как определить полезную мощность электрического тока? полную мощность источника тока?
7. Что называют коэффициентом полезного действия (КПД) источника тока?

Пример решения задачи

Резистор с сопротивлением $R = 3,0$ Ом подключён к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 8,0$ В и внутренним сопротивлением $r = 1,0$ Ом. Определите полезную мощность тока и КПД источника тока в данной цепи.

Дано:

$$R = 3,0 \text{ Ом}$$

$$\mathcal{E} = 8,0 \text{ В}$$

$$r = 1,0 \text{ Ом}$$

$$P_{\text{полезн}} \text{ — ?}$$

$$\eta \text{ — ?}$$

Решение. Полезной является мощность тока на внешнем участке цепи, т. е. на резисторе: $P_{\text{полезн}} = I^2 R$. С учётом закона Ома для полной цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ получим:

$$P_{\text{полезн}} = \mathcal{E}^2 \frac{R}{(R+r)^2}.$$

$$P_{\text{полезн}} = \frac{64 \text{ В}^2 \cdot 3,0 \text{ Ом}}{(3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом})^2} = 12 \text{ Вт}.$$

КПД источника тока в данной цепи определим по формуле

$$\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100 \text{ \%}.$$

$$\eta = \frac{3,0 \text{ Ом}}{3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом}} \cdot 100 \text{ \%} = 75 \text{ \%}.$$

Ответ: $P_{\text{полезн}} = 12 \text{ Вт}$, $\eta = 75 \text{ \%}$.

**Упражнение 19**

1. Резистор с сопротивлением $R = 2$ Ом подключён к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 5$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,5$ Ом. Определите силу тока в цепи и падение напряжения на внешнем и внутреннем участках электрической цепи.

2. Реостат подключён к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 4$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом. Постройте график зависимости силы тока от сопротивления той части реостата, по которой проходит ток, $I = I(R)$.

3. При подключении к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 2,2$ В резистора с сопротивлением $R = 4,0$ Ом сила тока в цепи $I = 0,50$ А. Определите силу тока при коротком замыкании источника тока.

4. На рисунке 133 представлен график зависимости силы тока в реостате от его сопротивления. Определите силу тока при коротком замыкании источника тока и его внутреннее сопротивление.

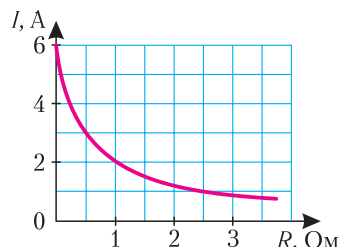


Рис. 133

5. Определите полную мощность, развиваемую источником тока с внутренним сопротивлением $r = 0,50$ Ом, при подключении к нему резистора с сопротивлением $R = 2,0$ Ом, если напряжение на резисторе $U = 4,0$ В.

6. Спираль нагревательного элемента, сопротивление которой $R = 38$ Ом, подключена к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 2,0$ Ом. Определите количество теплоты, которое выделится в спирали за промежуток времени $t = 10$ мин.

7. Два параллельно соединённых резистора, сопротивления которых $R_1 = 4,0$ Ом и $R_2 = 6,0$ Ом, подключили к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,60$ Ом. Определите напряжение на резисторах и силу тока в каждом из них.

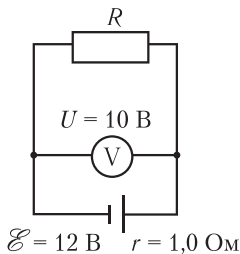


Рис. 134

8. На рисунке 134 представлена схема электрической цепи, состоящей из источника тока, резистора и идеального вольтметра. Определите работу электрического тока на внешнем участке цепи за промежуток времени $t = 10$ мин и КПД источника тока.

9. На рисунке 135 представлена схема электрической цепи, состоящей из источника тока, ключа и трёх резисторов. Выберите из предложенного перечня три верных утверждения. Укажите их номера.

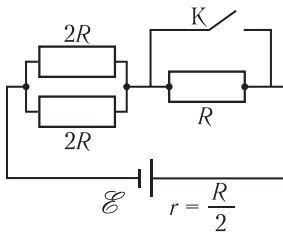


Рис. 135

1) Полезную мощность тока на внешнем участке цепи при разомкнутом ключе можно определить по

$$\text{формуле } P_{\text{полезн}} = \frac{8\mathcal{E}^2}{25R}.$$

2) Мощность, развиваемую сторонними силами источника тока при замкнутом ключе, можно определить

$$\text{по формуле } P_{\text{ст}} = \frac{\mathcal{E}^2}{3R}.$$

3) Полезную работу тока на внешнем участке цепи при замкнутом ключе можно определить по формуле

$$A_{\text{полезн}} = \frac{4\mathcal{E}^2}{9R}t.$$

4) Работу сторонних сил источника тока при разомкнутом ключе можно определить по формуле $A_{\text{ст}} = \frac{2\mathcal{E}^2}{3R}t$.

5) КПД источника тока при разомкнутом ключе $\eta = 80\%$.

