

ЭДС. Закон Ома для полной цепи

Темы кодификатора ЕГЭ: электродвижущая сила, внутреннее сопротивление источника тока, закон Ома для полной электрической цепи.

До сих пор при изучении электрического тока мы рассматривали направленное движение свободных зарядов во *внешней цепи*, то есть в проводниках, подсоединённых к клеммам источника тока.

Как мы знаем, положительный заряд q :

- уходит во внешнюю цепь с положительной клеммы источника;
- перемещается во внешней цепи под действием стационарного электрического поля, создаваемого другими движущимися зарядами;
- приходит на отрицательную клемму источника, завершая свой путь во внешней цепи.

Теперь нашему положительному заряду q нужно замкнуть свою траекторию и вернуться на положительную клемму. Для этого ему требуется преодолеть заключительный отрезок пути — внутри источника тока от отрицательной клеммы к положительной. Но вдумайтесь: идти туда ему совсем не хочется! Отрицательная клемма притягивает его к себе, положительная клемма его от себя отталкивает, и в результате на наш заряд внутри источника действует электрическая сила $\vec{F}_{\text{эл}}$, направленная *против* движения заряда (т. е. против направления тока).

Сторонняя сила

Тем не менее, ток по цепи идёт; стало быть, имеется сила, «протаскивающая» заряд сквозь источник вопреки противодействию электрического поля клемм (рис. 1).

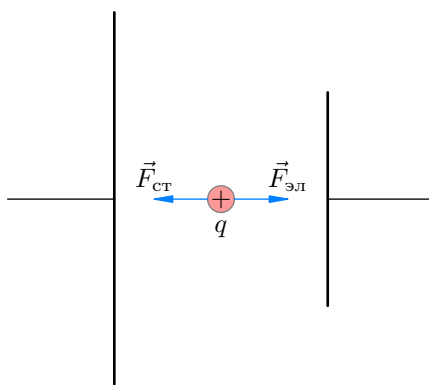


Рис. 1. Сторонняя сила

Эта сила называется *сторонней силой*; именно благодаря ей и функционирует источник тока. Сторонняя сила $\vec{F}_{\text{ст}}$ не имеет отношения к стационарному электрическому полю — у неё, как говорят, *неэлектрическое* происхождение; в батарейках, например, она возникает благодаря протеканию соответствующих химических реакций.

Обозначим через $A_{\text{ст}}$ работу сторонней силы по перемещению положительного заряда q внутри источника тока от отрицательной клеммы к положительной. Эта работа положительна, так как направление сторонней силы совпадает с направлением перемещения заряда. Работа сторонней силы $A_{\text{ст}}$ называется также *работой источника тока*.

Во внешней цепи сторонняя сила отсутствует, так что работа сторонней силы по перемещению заряда во внешней цепи равна нулю. Поэтому работа сторонней силы по перемещению заряда q вокруг всей цепи сводится к работе по перемещению этого заряда только лишь внутри источника тока. Таким образом, $A_{ст}$ — это также работа сторонней силы по перемещению заряда *по всей цепи*.

Мы видим, что сторонняя сила является непотенциальной — её работа при перемещении заряда по замкнутому пути не равна нулю. Именно эта непотенциальность и обеспечивает циркулирование электрического тока; потенциальное электрическое поле, как мы уже говорили ранее, не может поддерживать постоянный ток.

Опыт показывает, что работа $A_{ст}$ прямо пропорциональна перемещаемому заряду q . Поэтому отношение $A_{ст}/q$ уже не зависит от заряда и является количественной характеристикой источника тока. Это отношение обозначается \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q} . \quad (1)$$

Данная величина называется *электродвижущей силой* (ЭДС) источника тока. Как видим, ЭДС измеряется в вольтах (В), поэтому название «электродвижущая сила» является крайне неудачным. Но оно давно укоренилось, так что приходится смириться.

Когда вы видите надпись на батарейке: «1,5 В», то знайте, что это именно ЭДС. Равна ли эта величина напряжению, которое создаёт батарейка во внешней цепи? Оказывается, нет! Сейчас мы поймём, почему.

Закон Ома для полной цепи

Любой источник тока обладает своим сопротивлением r , которое называется *внутренним сопротивлением* этого источника. Таким образом, источник тока имеет две важных характеристики: ЭДС и внутреннее сопротивление.

Пусть источник тока с ЭДС, равной \mathcal{E} , и внутренним сопротивлением r подключён к резистору R (который в данном случае называется *внешним резистором*, или *внешней нагрузкой*, или *полезной нагрузкой*). Всё это вместе называется *полной цепью* (рис. 2).

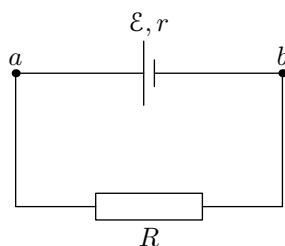


Рис. 2. Полная цепь

Наша задача — найти силу тока I в цепи и напряжение U на резисторе R .

За время t по цепи проходит заряд $q = It$. Согласно формуле (1) источник тока совершает при этом работу:

$$A_{ст} = \mathcal{E}q = \mathcal{E}It. \quad (2)$$

Так как сила тока постоянна, работа источника целиком превращается в теплоту, которая выделяется на сопротивлениях R и r . Данное количество теплоты определяется законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2Rt + I^2rt = I^2(R + r)t. \quad (3)$$

Итак, $A_{\text{ст}} = Q$, и мы приравняем правые части формул (2) и (3):

$$\mathcal{E}It = I^2(R + r)t.$$

После сокращения на It получаем:

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

Вот мы и нашли ток в цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (4)$$

Формула (4) называется *законом Ома для полной цепи*.

Если соединить клеммы источника проводом пренебрежимо малого сопротивления ($R = 0$), то получится *короткое замыкание*. Через источник при этом потечёт максимальный ток — *ток короткого замыкания*:

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

Из-за малости внутреннего сопротивления ток короткого замыкания может быть весьма большим. Например, пальчиковая батарейка разогревается при этом так, что обжигает руки.

Зная силу тока (формула (4)), мы можем найти напряжение на резисторе R с помощью закона Ома для участка цепи:

$$U = IR = \frac{\mathcal{E}R}{R + r}. \quad (5)$$

Это напряжение является разностью потенциалов между точками a и b (рис. 2). Потенциал точки a равен потенциалу положительной клеммы источника; потенциал точки b равен потенциалу отрицательной клеммы. Поэтому напряжение (5) называется также *напряжением на клеммах источника*.

Мы видим из формулы (5), что в реальной цепи будет $U < \mathcal{E}$ — ведь \mathcal{E} умножается на дробь, меньшую единицы. Но есть два случая, когда $U = \mathcal{E}$.

1. *Идеальный источник тока*. Так называется источник с нулевым внутренним сопротивлением. При $r = 0$ формула (5) даёт $U = \mathcal{E}$.
2. *Разомкнутая цепь*. Рассмотрим источник тока сам по себе, вне электрической цепи. В этом случае можно считать, что внешнее сопротивление бесконечно велико: $R = \infty$. Тогда величина $R + r$ неотличима от R , и формула (5) снова даёт нам $U = \mathcal{E}$.

Смысл этого результата прост: *если источник не подключён к цепи, то вольтметр, подсоединённый к полюсам источника, покажет его ЭДС*.

КПД электрической цепи

Нетрудно понять, почему резистор R называется полезной нагрузкой. Представьте себе, что это лампочка. Теплота, выделяющаяся на лампочке, является *полезной*, так как благодаря этой теплоте лампочка выполняет своё предназначение — даёт свет.

Количество теплоты, выделяющееся на полезной нагрузке R за время t , обозначим $Q_{\text{полезн}}$. Если сила тока в цепи равна I , то

$$Q_{\text{полезн}} = I^2Rt.$$

Некоторое количество теплоты выделяется также на источнике тока:

$$Q_{\text{ист}} = I^2rt.$$

Полное количество теплоты, которое выделяется в цепи, равно:

$$Q_{\text{полн}} = Q_{\text{полезн}} + Q_{\text{ист}} = I^2Rt + I^2rt = I^2(R + r)t.$$

КПД электрической цепи — это отношение полезного тепла к полному:

$$\eta = \frac{Q_{\text{полезн}}}{Q_{\text{полн}}} = \frac{I^2 R t}{I^2 (R + r) t} = \frac{R}{R + r}.$$

КПД цепи равен единице лишь в том случае, если источник тока идеальный ($r = 0$).

Закон Ома для неоднородного участка

Простой закон Ома $U = IR$ справедлив для так называемого однородного участка цепи — то есть участка, на котором нет источников тока. Сейчас мы получим более общие соотношения, из которых следует как закон Ома для однородного участка, так и полученный выше закон Ома для полной цепи.

Участок цепи называется *неоднородным*, если на нём имеется источник тока. Иными словами, неоднородный участок — это участок с ЭДС.

На рис. 3 показан неоднородный участок, содержащий резистор R и источник тока. ЭДС источника равна \mathcal{E} , его внутреннее сопротивление считаем равным нулю¹.

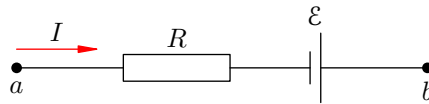


Рис. 3. ЭДС «помогает» току: $\varphi_a - \varphi_b + \mathcal{E} = IR$

Сила тока на участке равна I , ток течёт от точки a к точке b . Этот ток не обязательно вызван одним лишь источником \mathcal{E} . Рассматриваемый участок, как правило, входит в состав некоторой цепи (не изображённой на рисунке), а в этой цепи могут присутствовать и другие источники тока. Поэтому ток I является результатом совокупного действия *всех* источников, имеющихся в цепи.

Пусть потенциалы точек a и b равны соответственно φ_a и φ_b . Подчеркнём ещё раз, что речь идёт о потенциале стационарного электрического поля, порождённого действием всех источников цепи — не только источника, принадлежащего данному участку, но и, возможно, имеющихся вне этого участка.

Напряжение на нашем участке равно: $U = \varphi_a - \varphi_b$. За время t через участок проходит заряд $q = It$, при этом стационарное электрическое поле совершает работу:

$$A_{\text{поля}} = Uq = UIt.$$

Кроме того, положительную работу совершает источник тока (ведь заряд q прошёл сквозь него!):

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q = \mathcal{E}It.$$

Сила тока постоянна, поэтому суммарная работа по продвижению заряда q , совершаемая на участке стационарным электрическим полем и сторонними силами источника, целиком превращается в тепло: $A_{\text{поля}} + A_{\text{ст}} = Q$. Подставляем сюда выражения для $A_{\text{поля}}$, $A_{\text{ст}}$ и закон Джоуля–Ленца:

$$UIt + \mathcal{E}It = I^2 R t.$$

Сокращая на It , получаем закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$U + \mathcal{E} = IR, \tag{6}$$

¹Если внутреннее сопротивление источника равно r , можно просто заменить резистор R на резистор $R + r$.

или, что то же самое:

$$\varphi_a - \varphi_b + \mathcal{E} = IR. \quad (7)$$

Обратите внимание: перед \mathcal{E} стоит знак «плюс». Причину этого мы уже указывали — источник тока в данном случае совершает *положительную* работу, «протаскивая» внутри себя заряд q от отрицательной клеммы к положительной. Попросту говоря, источник «помогает» току протекать от точки a к точке b .

Отметим два следствия выведенных формул (6) и (7).

1. Если участок однородный, то $\mathcal{E} = 0$. Тогда из формулы (6) получаем $U = IR$ — закон Ома для однородного участка цепи.
2. Предположим, что источник тока обладает внутренним сопротивлением r . Это, как мы уже упоминали, равносильно замене R на $R + r$:

$$\varphi_a - \varphi_b + \mathcal{E} = I(R + r).$$

Теперь замкнём наш участок, соединив точки a и b . Получим рассмотренную выше полную цепь. При этом окажется, что $\varphi_a = \varphi_b$, и предыдущая формула превратится в закон Ома для полной цепи:

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

Таким образом, закон Ома для однородного участка и закон Ома для полной цепи оба вытекают из закона Ома для неоднородного участка.

Может быть и другой случай подключения, когда источник \mathcal{E} «мешает» току идти по участку. Такая ситуация изображена на рис. 4. Здесь ток, идущий от a к b , направлен против действия сторонних сил источника.

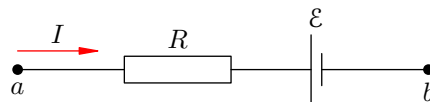


Рис. 4. ЭДС «мешает» току: $\varphi_a - \varphi_b - \mathcal{E} = IR$

Как такое возможно? Очень просто: другие источники, имеющиеся в цепи вне рассматриваемого участка, «пересиливают» источник на участке и вынуждают ток течь против \mathcal{E} . Именно так происходит, когда вы ставите телефон на зарядку: подключённый к розетке адаптер вызывает движение зарядов против действия сторонних сил аккумулятора телефона, и аккумулятор тем самым заряжается!

Что изменится теперь в выводе наших формул? Только одно — работа сторонних сил станет отрицательной:

$$A_{ст} = -\mathcal{E}q = -\mathcal{E}It.$$

Тогда закон Ома для неоднородного участка примет вид:

$$\varphi_a - \varphi_b - \mathcal{E} = IR, \quad (8)$$

или:

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

где по-прежнему $U = \varphi_a - \varphi_b$ — напряжение на участке.

Давайте соберём вместе формулы (7) и (8) и запишем закон Ома для участка с ЭДС следующим образом:

$$\varphi_a - \varphi_b \pm \mathcal{E} = IR.$$

Ток при этом течёт от точки a к точке b . Если направление тока совпадает с направлением сторонних сил, то перед \mathcal{E} ставится «плюс»; если же эти направления противоположны, то ставится «минус».