

§3. Электрический ток. Сила тока. Плотность тока. Закон Ома для однородного участка цепи. Закон Джоуля-Ленца

Понятие об электрическом токе

Электрическим током называется любое упорядоченное движение носителей электрического заряда.

Электрический ток в металлах обусловлен движением электронов, в жидких проводниках – движением положительных и отрицательных ионов, в газах – ионов и электронов.

Для того чтобы в проводнике возник электрический ток, необходимо создать в нём электрическое поле. При наличии поля на хаотическое движение свободных зарядов накладывается направленное движение: положительные заряды перемещаются в направлении поля, т. е. в сторону убыли потенциала, отрицательные – против поля (в сторону возрастания потенциала).

Наличие электрического поля и свободных электрических зарядов – неперенные условия возникновения и существования тока. За направление тока принимается направление движения положительных зарядов.

Количественной мерой электрического тока является сила тока i – скалярная физическая величина, модуль которой равен абсолютной величине заряда, прошедшего через данную поверхность S за единицу времени. Ничего общего с понятием сила термин сила тока не имеет. Если dq – заряд, прошедший через S за время dt , то

$$|i| = \frac{|dq|}{dt}. \quad (8.1.1)$$

Единица силы тока – ампер (А).

Сила тока – величина алгебраическая: она может быть положительной и отрицательной. Если направление тока образует с нормалью к элементам S острые углы, то $i > 0$, если тупые, то $i < 0$ (направления нормалей выбираются произвольно).

Обычно интересуются током, протекающим через площадь поперечного сечения проводника, поэтому под силой тока в проводнике будем подразумевать именно эту величину.

Если ток создаётся и положительными и отрицательными носителями заряда, то

$$|i| = \frac{|dq_+|}{dt} + \frac{|dq_-|}{dt},$$

где dq_+ и dq_- – положительный и отрицательный заряды, прошедшие через рассматриваемую поверхность за время dt .

Ток называется постоянным, если он не изменяется ни по модулю, ни по направлению. Постоянный ток обозначается буквой I . В случае постоянного тока дифференциальное соотношение (8.1.1) заменяется более простым

$$|I| = \frac{|q|}{t},$$

где q – заряд, прошедший через данную поверхность S за конечный промежуток времени t .

Ток называется переменным, если он изменяется и по модулю, и по направлению.

Плотность тока

Может случиться, что ток распределяется по рассматриваемой поверхности неравномерно. Для характеристики распределения тока по поверхности, сквозь которую он течёт, вводится векторная величина, называемая плотностью тока.

Плотность тока \vec{j} – вектор, численно равный модулю тока, протекающего через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к электрическому полю, вызвавшему ток, и совпадающий по направлению с направлением тока (т. е. с направлением движения положительных зарядов).

Если dS – элементарная площадка, α – угол между нормалью к этой площадке и направлением поля в том месте, где расположена площадка, dI – ток, протекающий через dS (рис. 8.1), то числовое значение вектора \vec{j} равно

$$j = \frac{|dI|}{dS \cos \alpha} = \frac{|dI|}{dS_{\perp}}, \quad (8.1.2)$$

где $dS_{\perp} = dS \cos \alpha$ – проекция площадки dS на плоскость, перпендикулярную к линиям поля.

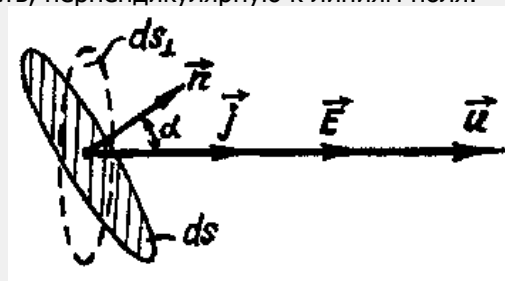


Рис. 8.1

Модуль плотности тока определяет абсолютную величину заряда, прошедшего за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению упорядоченного движения носителей заряда.

Из (8.1.2) следует, что ток, протекающий через элементарную площадку dS , ориентированную в проводнике произвольно, равен

$$dI = j dS \cos \alpha = \vec{j} d\vec{S}, \quad (8.1.3)$$

где $d\vec{S}$ – вектор, численно равный dS и направленный по нормали к площадке dS .

Чтобы найти ток, протекающий через всю поверхность S , например через площадь поперечного сечения проводника, нужно проинтегрировать (8.1.3) по S :

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}. \quad (8.1.4)$$

Из (8.1.4) видно, что ток, протекающий через данную поверхность S , есть поток вектора \vec{j} через эту поверхность.

Закон Ома для однородного участка цепи

Однородным называется участок цепи, в котором на заряды действуют только электростатические силы.

Г. Ом (Германия) в 1826 г. экспериментально установил интегральный закон, согласно которому сила электрического тока, текущего от точки 1 к точке 2 однородного участка цепи, пропорциональна разности потенциалов на концах этого участка:

$$I_{12} = G_{12} (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Положительная величина G_{12} называется **электрической проводимостью** участка. Единица электрической проводимости – **сименс** (См): 1 См – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом. Величина, обратная электрической проводимости, называется **электрическим сопротивлением**

$$\frac{1}{G_{12}} = R_{12}.$$

Тогда

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}}. \quad (8.1.5)$$

Сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна разности потенциалов, приложенной к его концам, и обратно пропорциональна сопротивлению участка.

Закон Джоуля-Ленца

При прохождении электрического тока по проводнику энергия тока превращается в другие виды энергии: во внутреннюю энергию проводника и окружающей среды (при нагревании), в механическую энергию проводника (при движении проводника в магнитном поле) и т. д.

Если проводник, по которому течёт ток, неподвижен, в проводнике под действием тока не происходит химических реакций и температура проводника не изменяется (стационарное состояние), то вся энергия, выделяющаяся в проводнике, отдаётся в окружающую среду в форме теплопередачи. Э. Х. Ленц (Россия) и Д. П. Джоуль (Англия) установили экспериментальный закон, согласно которому **количество тепла, отдаваемого проводником в окружающую среду, пропорционально сопротивлению проводника, квадрату силы тока и времени прохождения тока:**

$$Q_{12} = I^2 R_{12} t. \quad (8.1.12)$$

Выделение тепла при прохождении тока по проводнику происходит за счёт работы тока. Если участок цепи, образованный данным проводником, однородный (не содержит источника тока), то эта работа совершается силами электростатического поля, существующего в проводнике.

§4. ЭДС источника тока, разность потенциалов, напряжение

Для возникновения в проводнике электрического тока необходимо, чтобы внутри проводника существовало **электрическое поле**. Для этого достаточно разделить заряды противоположных знаков, сосредоточив в одном месте цепи избыточный положительный заряд, в другом отрицательный.

Силы, разделяющие заряды в электрической цепи, создающие в ней электростатическое поле, называются **сторонними**. Устройства, в которых действуют сторонние силы, называются **источниками тока**.

Природа сторонних сил может быть различной. В одних источниках эти силы обусловлены химическими процессами (гальванические элементы), в других – диффузией носителей заряда и контактными явлениями (контактные ЭДС), в третьих – наличием вихревого электрического поля (электрические генераторы) и т. д.

Участок цепи, в котором на заряды действуют только электростатические силы, называется **однородным**. Участок, в котором на заряды одновременно действуют и электростатические и сторонние силы, называется

неоднородным. Иными словами, неоднородный участок – это участок, содержащий источник тока. На **рис. 8.6** схематически изображена электрическая цепь.

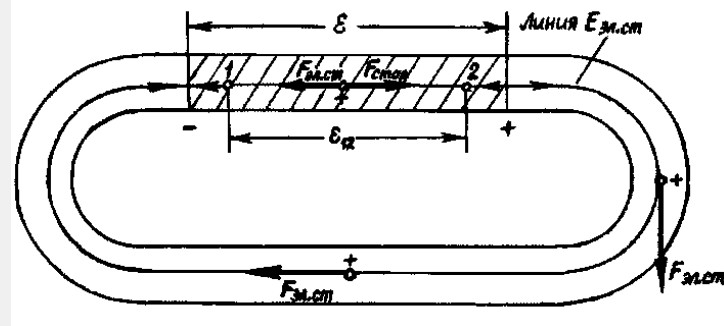


Рис. 8.6

Штриховкой покрыта область, в которой действуют и электростатические и сторонние силы (это источник тока, внутренняя часть цепи); не покрыта штриховкой область, где действуют только электростатические силы (внешний участок цепи). В источнике тока перемещение зарядов обусловлено действием и электростатических и сторонних сил, во внешней цепи – только действием электростатических (мы не рассматриваем сил сопротивления, которые на самом деле действуют на заряды при их движении и во внешней и во внутренней цепи).

Выберем в электрической цепи произвольный неоднородный участок 1–2 (см. **рис. 8.6**). При перемещении зарядов по этому участку электростатические и сторонние силы совершают работу. Работу сторонних сил характеризует **электродвижущая сила** (сокращённо – ЭДС). Обратим внимание на то, что здесь слово **сила** снова не имеет отношения к понятию **сила**. ЭДС не является силовой, характеристикой источника тока.

Электродвижущей силой на данном участке цепи 1–2 называется скалярная физическая величина, численно равная работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного точечного заряда из точки 1 в точку 2:

$$\varepsilon_{12} = \frac{A_{сторон12}}{q_+}. \quad (8.2.1)$$

Работу электростатических сил характеризует **разность потенциалов**.

Разностью потенциалов между точками 1 и 2 электрической цепи называется скалярная физическая величина, численно равная убыли потенциальной энергии единичного положительного точечного заряда при его перемещении из точки 1 в точку 2 или, что то же самое, **равная работе, совершаемой электростатическими силами при перемещении этого заряда из точки 1 в точку 2:**

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{эл.ст.12}}{q_+}. \quad (8.2.2)$$

Совместную работу сторонних и электростатических сил на данном участке цепи характеризует **напряжение**.

Напряжением U_{12} на данном участке 1–2 называется физическая величина, численно равная алгебраической сумме работ, совершаемых электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного точечного заряда из точки 1 в точку 2:

$$U_{12} = \frac{A_{эл.ст.12}}{q_+} + \frac{A_{сторон.12}}{q_+},$$

или, учитывая (8.2.1) и (8.2.2),

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}. \quad (8.2.3)$$

§5. Закон Ома для неоднородного участка цепи.

Следствия из закона Ома. Правила Кирхгофа

Закон Ома для неоднородного участка цепи

Если сопротивление неоднородного участка 1–2 равно R_{12} и по нему течёт ток I , то напряжение равно произведению силы тока на сопротивление участка: $U_{12} = IR_{12}$.

Поставив напряжение в формулу (8.2.3) и решив полученное выражение относительно I , получим **закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме**:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}}{R_{12}}. \quad (8.2.5)$$

Ток, разность потенциалов и ЭДС в этой формуле – величины алгебраические. Чтобы отразить это, запишем (8.2.5) в виде

$$\pm I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon_{12}}{R_{12}} \quad (8.2.6)$$

(формула записана для случая, когда обход участка осуществляется от точки 1 к точке 2). Теперь под I и ε_{12} в (8.2.6) следует понимать модули этих величин.

Знак I и ε_{12} зависит от выбора направления обхода участка. Если направление тока совпадает с направлением обхода, его принято считать положительным; если источник тока повышает потенциал в направлении обхода (источник посылает ток в направлении обхода), то ЭДС такого источника считается положительной.

Рассмотрим пример (рис. 8.7).

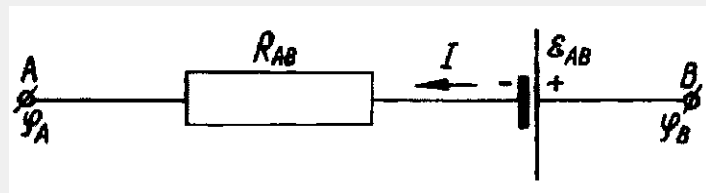


Рис. 8.7

Пусть ток течёт от B к A , а источник включен так, как это показано на рисунке. При обходе участка от A к B закон Ома запишется следующим образом:

$$-I = \frac{(\varphi_A - \varphi_B) + \varepsilon_{AB}}{R_{AB}},$$

при обходе от B к A

$$I = \frac{(\varphi_B - \varphi_A) - \varepsilon_{AB}}{R_{AB}}.$$

При изменении направления обхода на противоположное все величины, входящие в выражение закона Ома, изменяют свой знак. Это и понятно. Все эти величины связаны с работой, а знак работы зависит от направления перемещения: если направление перемещения изменяется на противоположное, то изменяется и знак работы.

Закон Ома и для однородного и для неоднородного участков – одно из проявлений закона сохранения и превращения энергии.

Обратимся теперь к полной, замкнутой цепи. Если рассматривается контур цепи в целом, то говорят об ЭДС, действующей в замкнутой цепи.

ЭДС, действующая в замкнутой цепи, численно равна работе, совершаемой сторонними силами при

перемещении единичного положительного заряда по всему контуру замкнутой цепи:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор.О}}}{q_+}. \quad (8.2.7)$$

Кружок О означает, что речь идёт о работе при переносе заряда по всему контуру замкнутой цепи.

Действие сторонних сил на заряженные частицы эквивалентно действию на них некоторого электрического поля. Стороннюю силу, отнесённую к единице положительного заряда, называют **напряжённостью поля сторонних сил**:

$$\vec{E}_{\text{стор}} = \frac{\vec{F}_{\text{стор}}}{q_+}.$$

Сторонняя сила, действующая на произвольный точечный заряд q_+ , равна

$$\vec{F}_{\text{стор}} = q_+ \vec{E}_{\text{стор}}.$$

Работа, совершаемая сторонними силами при перемещении заряда q_+ по замкнутой цепи, есть криволинейный интеграл, взятый по замкнутому пути L :

$$A_{\text{стор.О}} = \oint_L \vec{F}_{\text{стор}} d\vec{l} = q_+ \oint_L \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}. \quad (8.2.8)$$

Подставив (8.2.8) в (8.2.7), получим

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}.$$

Правая часть этого выражения есть циркуляция вектора напряжённости поля сторонних сил. Следовательно, **ЭДС, действующая в замкнутой цепи, есть циркуляция вектора напряжённости поля сторонних сил**.

На перемещение заряда по цепи источник затрачивает вполне определённую энергию. По своему смыслу ЭДС есть энергия, затрачиваемая источником на перемещение единичного заряда по всей замкнутой цепи.

Следствия из закона Ома

Обратимся к следствиям, вытекающим из закона Ома для неоднородного участка цепи:

1) если источник тока на данном участке отсутствует ($\varepsilon_{12} = 0$), то формула (8.2.5) переходит в выражение **закона Ома для однородного участка**:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}}.$$

2) если цепь замкнута ($\varphi_1 - \varphi_2 = 0$), то формула (8.2.5) переходит в **закон Ома для полной цепи**:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

где ε – ЭДС источника, действующего в цепи; R – сопротивление внешнего участка цепи; r – сопротивление внутреннего участка (источника тока).

3) если цепь разомкнута (тока в ней нет), то напряжение равно нулю ($IR_{12} = 0$) и из (8.2.4) следует:

$$\varepsilon_{12} = -(\varphi_1 - \varphi_2),$$

т. е. ЭДС равна по абсолютной величине и противоположна по знаку разности потенциалов на зажимах разомкнутого источника тока.

Правила Кирхгофа

Правила Кирхгофа (их два) являются следствиями, вытекающими из законов сохранения заряда и энергии.

Первое правило относится к узлам цепи. Узел – это точка цепи, в которой сходятся не менее трёх проводников (рис. 8.8).

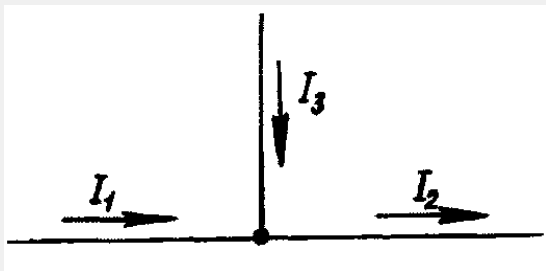


Рис. 8.8

Токам, сходящимся в узле, приписываются в зависимости от направления знаки «плюс» или «минус». Токам, входящим в узел, приписывается один знак, выходящим из узла – другой. Первое правило Кирхгофа гласит: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum_{k=1}^N I_k = 0.$$

Это правило является следствием закона сохранения заряда.

Второе правило Кирхгофа относится к отдельным замкнутым контурам разветвлённой цепи: в любом замкнутом контуре разветвлённой цепи алгебраическая сумма напряжений равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^N I_k R_k = \sum_{i=1}^M \mathcal{E}_i. \quad (8.3.1)$$

Это правило является следствием закона сохранения энергии и выводится из закона Ома для неоднородного участка цепи.