

Постоянный электрический ток. Закон Ома

1. Электрический ток в металлах. Сила тока и плотность тока

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

За **направление тока** принимают направление движения положительных зарядов.

Количественной мерой электрического тока служит **сила тока** I - *скалярная физическая величина, равная отношению заряда dq , переносимого сквозь рассматриваемую поверхность за малый промежуток времени, к величине dt этого промежутка:*

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Электрический ток называется постоянным, если сила тока и его направление не изменяются с течением времени.

Для постоянного тока: $I = \frac{q}{\Delta t}$, где q — электрический заряд, проходящий за время Δt через поперечное сечение проводника.

Единица силы тока — ампер (А)

Для характеристики направления электрического тока в разных точках рассматриваемой поверхности и распределения силы тока по этой поверхности служит **вектор плотности тока** \vec{j} . Сила тока сквозь произвольную поверхность S определяется как поток вектора плотности тока

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}$$

где $d\vec{S} = dS\vec{n}$ (\vec{n} — единичный вектор нормали (орт) к площадке dS).

Плотностью электрического тока называется вектор \vec{j} , совпадающий с направлением электрического тока в рассматриваемой точке и численно равный отношению силы тока dI сквозь малый элемент поверхности, **ортогональной** направлению тока, к площади dS_{\perp} этого элемента:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$$

Для постоянного тока I , текущего перпендикулярно сечению S проводника:

$$j = \frac{I}{S}$$

Если за время dt через поперечное сечение S проводника переносится заряд $dq = ne\langle v \rangle S dt$ (где n , e и $\langle v \rangle$ — концентрация, заряд и средняя скорость упорядоченного движения зарядов), то сила тока $I = dq/dt = ne\langle v \rangle S$, а плотность тока: $\vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle$

Единица плотности тока — А/м²

2. Электродвижущая сила, физический смысл понятия сторонних сил

Для возникновения и существования электрического тока необходимо:

1) наличие свободных **носителей тока** — заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно;

2) наличие **электрического поля**, энергия которого должна каким-то образом восполняться.

Если в цепи действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение носителей таким образом, что потенциалы всех точек цепи выравниваются и электростатическое поле исчезает.

Для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет **сил не электростатического происхождения**.

Такие устройства называются **источниками тока**.

Природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах они возникают за счет энергии химических реакций между электродами и электролитами; в генераторе — за счет механической энергии вращения ротора генератора, в солнечных батареях — за счет энергии фотонов и т.п.

*Физическая величина, определяемая работой, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда, называется **электродвижущей силой** (ЭДС) действующей в цепи:*

$$\varepsilon = \frac{A}{q}$$

Эта работа совершается за счет энергии, затрачиваемой в источнике тока, поэтому величину ε , можно назвать электродвижущей силой источника тока, включенного в цепь.

ЭДС, как и потенциал выражается в **вольтах**.

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется **однородным**. Участок, на котором на носители тока действуют сторонние силы, называется **неоднородным**.

Работа сторонних сил по перемещению заряда q_0 на **замкнутом участке цепи**

$$A = \oint \vec{F}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l} = q_0 \oint \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l}$$

Отсюда, ЭДС действующая в замкнутой цепи — это циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил:

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l}$$

Следовательно, для поля сторонних сил циркуляция его напряженности по замкнутому контуру **не равна нулю**. Поэтому поле сторонних сил — **непотенциально**.

ЭДС, действующая на участке 1–2 цепи, равна

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l}$$

Если на заряд q_0 действуют как сторонние силы, так и силы электростатического поля, то результирующая сила

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{стор}} + \vec{F}_e = q_0 (\vec{E}_{\text{стор}} + \vec{E})$$

Работа результирующей силы по перемещению заряда q_0 на участке 1—2

$$A_{12} = q_0 \int \vec{E}_{\text{сторон}} d\vec{l} + q_0 \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = q_0 \varepsilon_{12} + q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Для замкнутой цепи работа электростатических сил равна нулю, поэтому

$$A = q_0 \varepsilon$$

Напряжением U на участке 1—2 называется физическая величина, численно равная суммарной работе совершаемой электростатическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$$

Понятие **напряжения** является обобщением понятия разности потенциалов: *напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов, если участок не содержит источника тока* (т.е. на участке не действует ЭДС; сторонние силы отсутствуют)

3. Интегральная и дифференциальная формы закона Ома. Сопротивление.

Закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источника тока): *сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению на концах проводника* (интегральная форма закона Ома)

$$I = \frac{U}{R}$$

Коэффициент R называется **электрическим сопротивлением проводника**.

Единица электрического сопротивления — ом (Ом).

Величина $G = 1/R$ называется **электрической проводимостью** проводника.

Единица электрической проводимости — сименс (См)

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала из которого проводник изготовлен. Например, для однородного линейного проводника длиной l и площадью поперечного сечения S сопротивление рассчитывается по формуле: $R = \rho \frac{l}{S}$

где коэффициент пропорциональности ρ , характеризующий материал проводника, называется **удельным электрическим сопротивлением**

Единица удельного электрического сопротивления — (Ом·м)

Величина обратная удельному сопротивлению называется **удельной электрической проводимостью вещества** проводника:

$$\gamma = 1/\rho$$

Единица удельной электрической проводимости — сименс на метр (См/м).

Опытным путем было установлено, что для большинства случаев изменение удельного сопротивления ρ (значит и сопротивления) с температурой описывается линейным законом:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \text{ или } R = R_0(1 + \alpha t)$$

где ρ и ρ_0 , R и R_0 — соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при температурах t и 0°C (шкала Цельсия), α — **температурный коэффициент сопротивления**.

На зависимости электрического сопротивления металлов от температуры основано действие **термометров сопротивления**.

Сопротивление многих металлов при очень низких температурах $T_k(0,14\text{--}20 \text{ К (шкала Кельвина))$, называемых **критическими**, характерных для каждого вещества, скачкообразно уменьшается до нуля и металл становится абсолютным проводником. Это явление называется **сверхпроводимостью**.

В проводнике $E = U/l$ — напряженность электрического поля, $R = \rho \frac{l}{S}$, $j = \frac{I}{S}$. Из закона Ома получим соотношение $\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}$, откуда $j = \gamma E$.

В векторной форме соотношение $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ называется **законом Ома в дифференциальной форме**. Этот закон связывает плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в той же точке.

Работа и мощность постоянного тока. Правила Кирхгофа

1 Работа постоянного тока. Закон Джоуля–Ленца в дифференциальной и интегральной форме.

Кулоновские и сторонние силы при перемещении заряда q вдоль электрической цепи совершают работу A .

Рассмотрим однородный проводник с сопротивлением R к концам которого приложено напряжение U . За время dt через сечение проводника переносится заряд $dq = Idt$. Работа по перемещению заряда q_0 между двумя точками поля равна:

$$A_{12} = q_0 \Delta \phi, \quad \text{откуда} \quad dA = Udq = UI dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt.$$

$$\text{Мощность тока: } P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Единицы измерения: *работы тока* — Джоуль (Дж), *мощности тока* — ватт (Вт)

Внесистемные единицы работы тока: ватт-час (Вт·ч) и киловатт-час (кВт·ч). $1 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3600 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$. Аналогично: $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$

При прохождении тока по проводнику происходит рассеяние энергии вследствие столкновений носителей тока между собой и с любыми другими частицами среды. Если ток проходит по неподвижному проводнику, то вся работа тока dA идет на нагревание проводника (выделение теплоты dQ).

$$dQ = IUdt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$$

Количество теплоты Q , выделяющееся за конечный промежуток времени от 0 до t постоянным током I во всем объеме проводника, электрическое сопротивление которого равно R , получаем, интегрируя предыдущее выражение:

$$Q = \int_0^t I^2 R dt = I^2 R t$$

Закон Джоуля–Ленца (в интегральной форме): количество теплоты, выделяемое постоянным электрическим током на участке цепи, равно произведению квадрата силы тока на время его прохождения и электрическое сопротивление этого участка цепи.

Закон Джоуля–Ленца (в дифференциальной форме). Вывод:

Выделим в проводнике цилиндрический объем $dV = dS dl$ (ось цилиндра совпадает с направлением тока). Сопротивление этого объема $R = \rho dl/dS$

. По закону Джоуля–Ленца, за время dt в этом объеме выделится теплота

$$dQ = I^2 R dt = \frac{\rho dl}{dS} (jdS)^2 dt = \rho j^2 dV dt$$

Удельной тепловой мощностью тока w называется количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема:

$$w = \frac{dQ}{dV dt} = \rho j^2$$

Используя дифференциальную форму закона Ома $j = \gamma E$ и определение $\gamma = 1/\rho$, получим **закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме:**

$$w = jE = \gamma E^2$$

2. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Правила Кирхгофа для разветвленных электрических цепей.

Рассмотрим неоднородный участок цепи 1—2 на котором присутствуют силы неэлектрического происхождения (сторонние силы).

Общая работа A_{12} сторонних и электростатических сил, совершаемая над носителями тока, равна теплоте Q , выделяющейся на участке. Работа сил, совершаемая при перемещении заряда q_0 :

$$A_{12} = q_0 \varepsilon_{12} + q_0 \Delta\varphi.$$

ЭДС ε_{12} , как и сила тока I , — величина скалярная. Если ЭДС способствует движению положительных зарядов в выбранном направлении, то $\varepsilon_{12} > 0$, если препятствует, то $\varepsilon_{12} < 0$.

За время t в проводнике выделится теплота: $Q = I^2 R t = IR(It) = IRq_0$

Отсюда следует **закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме** который является **обобщенным законом Ома:**

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} \text{ или}$$

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R}.$$

Частные случаи.

1) Если на данном участке цепи источник тока отсутствует, то мы получаем закон Ома для однородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}$$

2) Если цепь замкнута ($\Delta\varphi = 0$), то получаем закон Ома для замкнутой цепи:

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

где ε – ЭДС, действующая в цепи,

R – сопротивление внешней цепи,

r – внутреннее сопротивление источника тока.

3) Если **цепь разомкнута**, то $I = 0$ и $\varepsilon_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$, т.е. ЭДС, действующая в разомкнутой цепи равна разности потенциалов на ее концах.

4) В случае **короткого замыкания** сопротивление внешней цепи $R = 0$ и сила тока в этом случае ограничивается только величиной внутреннего сопротивления источника тока $I = \varepsilon/r$.

Для определения величин токов в разветвленных электрических цепях пользуются **правилами Кирхгофа**.

Первое правило Кирхгофа — алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0$$

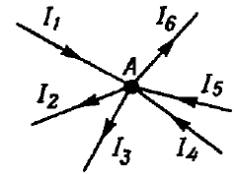


Рис. 19.1

Например, для узла А на рисунке 19.1 первое правило Кирхгофа $I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 - I_6 = 0$

Второе правило Кирхгофа — в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС ε_k , встречающихся в этом контуре:

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \varepsilon_k$$

Например, для обхода по часовой стрелке замкнутого контура ABCDA (рис 19.2) второе правило Кирхгофа имеет вид:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

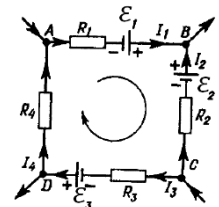


Рис. 19.2

3. Контактная разность потенциалов. Явления Пельтье и Томсона.

В 1797 г. итальянский физик Вольта опытным путем установил, что при тесном соприкосновении двух разнородных металлов между ними возникает разность потенциалов, зависящая только от их химического состава и температуры (**первый закон Вольты**)

Эта разность потенциалов названа **контактной**. Под *тесным* соприкосновением подразумевается сближение поверхностей металлов на расстояние порядка размера ячейки кристаллической решетки, что может быть обеспечено, например, путем сварки металлов.

Первой причиной возникновения контактной разности потенциалов является неодинаковость работ выхода электронов из разнородных металлов.

Работа, которую необходимо совершить, чтобы удалить электрон из металла в вакуум, не придав ему кинетической энергии, называется **работой выхода**. Она зависит от химической природы металла, чистоты и обработки поверхности. При контакте двух металлов с разной работой выхода металл, имеющий меньшее значение работы выхода электронов, легче их теряет и заряжается положительно, а металл с большей работой выхода накапливает электроны и заряжается отрицательно. Поэтому первая составляющая контактной разности потенциалов между металлами вследствие этой причины определяется выражением:

$$U' = \frac{A_2 - A_1}{e}$$

где A_1 и A_2 – работа выхода электрона из первого и второго металла;
 e – заряд электрона.

Вторая причина появления контактной разности потенциалов обусловлена различием концентраций свободных электронов в металлах. Необходимо хорошо представлять, что вследствие диффузии электроны начнут переходить из одного металла в другой, в результате чего тот из них, в котором концентрация электронов больше, будет их терять и приобретать положительный заряд. Другой металл, имеющий меньшую концентрацию электронов, зарядится отрицательно.

Составляющая контактной разности потенциалов, обусловленная различием концентраций свободных электронов в металлах, зависит от температуры T по закону

$$U'' = \frac{k}{e} T \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}$$

где k – постоянная Больцмана; n_{01} и n_{02} – концентрация свободных электронов соответственно в первом и втором металлах.

Зависимостью контактной разности потенциалов от температуры обусловлено явление, называемое **термоэлектрическим эффектом**.

Суммарная контактная разность потенциалов, обусловленная обеими причинами, будет

$$U = U' + U'' = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{k}{e} T \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}$$

В XIX веке было обнаружено, что в замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, может возникать электрический ток в тех случаях, если контакты (спаи) между проводниками имеют различную температуру. Такая электрическая цепь называется

термопарой. Электрический ток, возникающий в термопаре, называется **термоэлектрическим**.