

7. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 7.1 Электрический ток, сила и плотность тока

Электрическим током называется упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.

Сила тока – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечения проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (7.1)$$

Формула (7.1) в математике представляет собой производную, т.е. сила тока есть первая производная по времени от заряда прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени t .

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется **постоянным**. Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}, \quad (7.2)$$

где q – электрический заряд, проходящий за время t через поперечное сечение проводника. Единица силы тока – ампер (А). За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов. Так как в металлических проводниках заряд протекает при движении электронов, поэтому ток в металлах направлен в сторону, противоположную движению электронов.

Второй величиной, характеризующий ток, является плотность тока.

Плотность тока – физическая величина, численно равная силе тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника.

В общем случае при неравномерном распределении тока по сечению проводника (неоднородные проводники) под плотностью тока следует понимать отношение тока dI , проходящего через элемент сечения dS , перпендикулярного направлению тока, к величине dS этого элемента.

$$j = \frac{dI}{dS}. \quad (7.3)$$

В однородном проводнике плотность тока равна:

$$j = \frac{I}{S}. \quad (7.4)$$

Плотность тока - векторная величина. Направление вектора \vec{j} совпадает с направлением тока. Единица плотности тока – ампер на метр в квадрате (А/м²).

§ 7.2. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряжение

Если в цепи на носитель тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение носителей (они предполагаются положительными) от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. А это приведёт к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электрического тока. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил не электрической природы. Эти силы называются **сторонними силами**, а устройства для поддержания тока в цепи называются **источниками тока**.

Природа сторонних сил может быть разной. Например, в гальванических элементах они возникают за счёт энергии химических реакций между электродами и электролитами, в генераторе – за счёт механической энергии вращения ротора генератора. Роль источника тока в электрической цепи подобна роли насоса для перекачивания жидкости.

Под действием создаваемого поля сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля, благодаря чему на концах цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи течёт постоянный электрический ток.

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного электрического заряда от отрицательного полюса источника к положительному к величине заряда называется электродвижущей силой (ЭДС), действующей в цепи.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}. \quad (7.5)$$

Эта работа производится за счёт энергии, затрачиваемой в источнике тока, поэтому величину \mathcal{E} можно также называть электродвижущей силой источника тока, включенного в цепь. Часто вместо того, чтобы сказать: «В цепи действуют сторонние силы», говорят: «В цепи действует ЭДС», т.е. термин «электродвижущая сила» употребляется как характеристика сторонних сил. ЭДС как и потенциал выражается в вольтах.

Напряжением U на участке цепи 1-2 называется физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (7.6)$$

Понятие напряжение является обобщением понятия разности потенциалов:

напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов в том случае, если на этом участке не действует ЭДС, то есть сторонние силы отсутствуют.

Внутри проводника при протекании по нему тока существует электрическое поле. Напряженность электрического поля внутри однородного проводника постоянного сечения можно рассчитать по формуле:

$$E = \frac{U}{l}, \quad (7.7)$$

где l – длина проводника.

§ 7.3 Законы Ома для цепи постоянного тока

7.3.1 Закон Ома для однородного проводника

Закон Ома: *Сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.*

$$I = \frac{U}{R}, \quad (7.8)$$

где R – электрическое сопротивление проводника,

U – напряжение на проводнике.

Уравнение (7.8) выражает закон Ома для участка цепи, не содержащего источника тока.

7.3.2 Закон Ома для замкнутой цепи

Мы рассматривали закон Ома для однородного участка цепи, то есть такого, в котором не действует ЭДС (не действуют сторонние силы).

Чтобы в замкнутой цепи протекал ток постоянной величины, она должна содержать источник тока, который пополнял бы потери энергии зарядов, возникающие при протекании тока по участкам цепи, имеющих определенное сопротивление.

Рассмотрим простейшую замкнутую (полную) цепь, состоящую из источника тока с ЭДС \mathcal{E} и внешнего участка цепи сопротивлением R (рис. 7.1). При прохождении тока в цепи по ней протекает заряд, который равен $q = It$. Источник тока с ЭДС равной \mathcal{E} сообщает этому заряду энергию, равную работе сторонних сил.

Эта работа, как следует из формулы (7.5), равна

$$A_{ct} = \mathcal{E}q = \mathcal{E}It . \quad (7.9)$$

Сторонние силы, за счёт энергии, затрачиваемой в источнике тока, совершают работу по перемещению электрических зарядов как на внешнем участке цепи, так и внутри источника тока. Из этого следует, что, приравняв работу сторонних сил и работу тока в замкнутой цепи, получим:

$$\mathcal{E}It = I^2 R + r t ,$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока,

R – сопротивление внешней цепи.

Следовательно,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} . \quad (7.10)$$

Выражение (7.10) представляет собой **закон Ома для замкнутой цепи**:

сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

Внешнее и внутреннее сопротивление цепи соединены последовательно, поэтому полное сопротивление цепи равно их сумме.

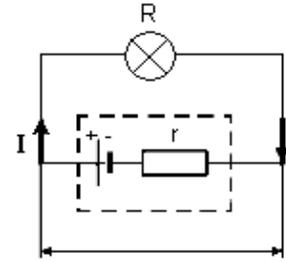


Рис. 7. 1

§ 7.4. Сопротивление проводников и их соединение

Сопротивление R является основной электрической характеристикой проводника. Чем больше электрическое сопротивление при заданном напряжении, тем меньше сила тока в проводнике. Сопротивление характеризует степень противодействия проводника направленному движению по нему зарядов.

Величина

$$G = \frac{1}{R} , \quad (7.11)$$

называется **электрической проводимостью проводника**. Единица проводимости – **сименс**. Сопротивление проводников зависит от его размеров и геометрической формы, от температуры, а также от материала, из которого проводник изготовлен.

Для однородного линейного проводника сопротивление R прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S} , \quad (7.12)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника.

Единица измерения удельного электрического сопротивления – $Ом \cdot м$.

Наименьшим удельным сопротивлением обладают: серебро ($1.6 \cdot 10^{-8} Ом \cdot м$) и медь ($1.7 \cdot 10^{-8} Ом \cdot м$).

Опыт показывает, что изменение сопротивления металлического проводника и его удельного сопротивления с изменением температуры описывается линейным законом:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t) ; \quad R_t = R_0 (1 + \alpha t) , \quad (7.13)$$

где ρ_t и ρ_0 , R_t и R_0 – соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при температуре $t^\circ C$ и при $t = 0^\circ C$,

α – температурный коэффициент, который для большинства чистых металлов близок к $1/273 K^{-1}$.

Впоследствии было обнаружено, что сопротивление многих металлов и их сплавов при очень низких температурах, называемых критическими, скачкообразно уменьшается до нуля, то есть металл становится абсолютным проводником. Впервые это физическое явление, названное сверхпроводимостью, было обнаружено в 1911 г.

На зависимости электрического сопротивления металлов от температуры основано действие термометров сопротивления, которые позволяют измерять температуру с точностью до $0,003\text{ K}$.

7.4.1 Последовательное соединение резисторов

В реальной электрической цепи к зажимам источника тока может быть подключено несколько соединительных проводников, а так же лампы, нагревательные и измерительные приборы, обладающие определенным сопротивлением. Основными типами соединений элементов электрической цепи являются последовательное и параллельное соединения.

Последовательное соединение – это соединение, при котором конец предыдущего проводника соединяется с началом последующего.

Рассмотрим схему последовательного соединения двух резисторов R_1 и R_2 (рис.7.2,а) и найдем результирующее сопротивление R между точками а и в (рис. 7.2 ,б).

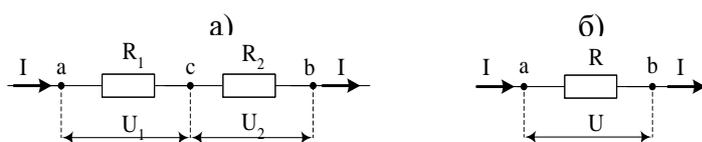


Рис. 7.2

Резистор R_1 подключенный между точками а и с соединен последовательно с резистором R_2 включенным между точками с и в. При последовательном соединении проводников сила тока,

протекающего через оба резистора, остается постоянной:

$$I = I_1 = I_2 . \quad (7.14)$$

Это следует из закона сохранения электрического заряда. Работа, совершаемая электрическим током при перемещении единичного положительного заряда из точки а в точку в, т.е. напряжение U , складывается из напряжения U_1 на участке а-с и напряжения U_2 на участке с-в:

$$U = U_1 + U_2 . \quad (7.15)$$

При последовательном соединении проводников общее напряжение цепи равно сумме напряжений на каждом проводнике.

Выразим каждое напряжение из закона Ома с учетом условия (7.8).

$$IR = IR_1 + IR_2 . \quad (7.16)$$

При последовательном соединении резисторов общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2 . \quad (7.17)$$

Если электрическая цепь содержит n последовательно соединенных проводников с сопротивлениями R_1, R_2, \dots, R_n , то

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n . \quad (7.18)$$

Сопротивление последовательного соединения проводников больше сопротивления любого из этих проводников.

Последовательное соединение проводников

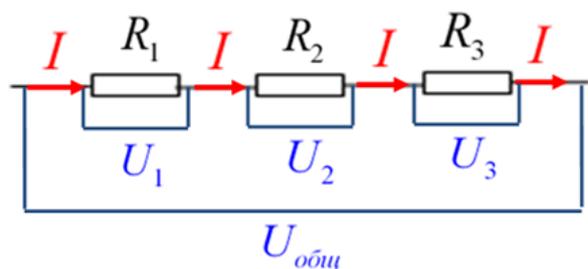


Рис. 7.3

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \\ U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \\ I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{array} \right.$$

7.4.2 Параллельное соединение резисторов

Параллельное соединение проводников – соединение, при котором все проводники подключены между одной и той же парой точек (узлами).

Точку разветвления цепи, в которой соединяются не менее трех проводников, называют **узлом электрической цепи**. Найдем результирующие сопротивления цепи R , образованной двумя резисторами, соединенными между узлами a и b (рис. 7.4).

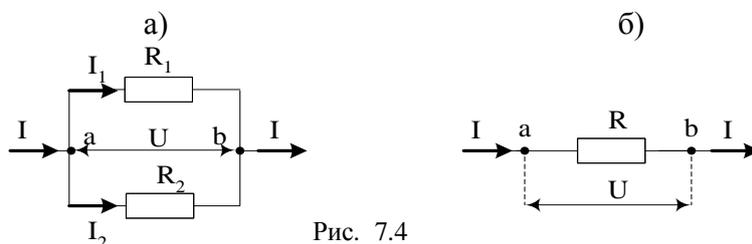


Рис. 7.4

В соответствии с законом сохранения электрического заряда заряд, поступающий за единицу времени в точку разветвления a , равен сумме зарядов, уходящих из этой точки за это же время, поэтому

$$I = I_1 + I_2. \quad (7.17)$$

Напряжение на каждом из параллельно соединенных проводников одно и то же:

$$U = U_1 = U_2. \quad (7.18)$$

Выразим силу тока для каждого проводника в формуле (7.17) из закона Ома с учетом равенства (7.8) получим

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}. \quad (7.19)$$

Тогда

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (7.20)$$

или в случае двух проводников имеем:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Сопротивление параллельного соединения проводников меньше сопротивления любого из этих проводников.

Параллельное соединение проводников

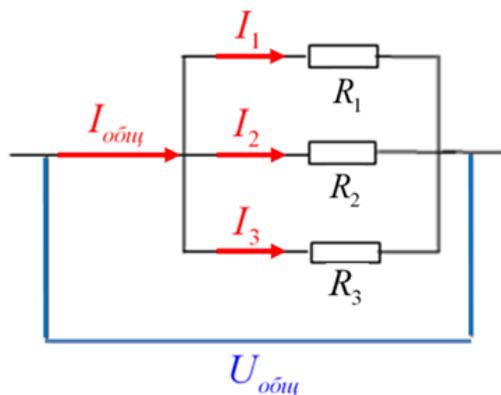


Рис. 7.5

$$\begin{cases} \frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \\ U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \\ I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \\ I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{cases}$$

§ 7.5 Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца

Рассмотрим однородный проводник, к концам которого приложено напряжение U . За время dt через сечение проводника переносится заряд $dq=Idt$. Работа, совершаемая силами электрического поля при перемещении заряда, может быть представлена по формуле

$$dA = Udq = IUdt . \quad (7.21)$$

Если сопротивление проводника R , то, используя закон Ома (7.8), получим:

$$dA = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt . \quad (7.22)$$

Мощность постоянного тока – это энергия, выделяющаяся за единицу времени:

$$P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} . \quad (7.23)$$

Работа тока выражается в джоулях, а мощность – в ваттах. На практике применяют также внесистемные единицы работы тока:

ватт-час (Вт·ч) и киловатт-час (кВт·ч). Для перехода в систему СИ необходимо выразить мощность в ватт, а время в секундах:

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 10^3 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Если происходит выделение энергии только в виде теплоты, т.е. вся работа идет на нагревание проводника, то по закону сохранения энергии

$$dQ = dA . \quad (7.24)$$

Таким образом, используя выражение (7.22) и (7.24), получим **закон Джоуля-Ленца**: количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока на сопротивление проводника и время прохождения по нему тока.

$$dQ = IUdt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt . \quad (7.25)$$

Этот закон был получен экспериментально английским ученым Дж. Джоулем и российским ученым Э. Х. Ленцем в 1831-1842 гг.

§ 7.7 Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Для упрощения расчетов сложных электрических цепей немецкий физик Кирхгоф вывел два правила. Первое правило относится к узлам (точкам разветвления) цепи, а второе – к замкнутым контурам, которые можно выделить из сколь угодно сложной цепи. Будем рассматривать электрическую цепь с установившимся режимом, который предполагает постоянство токов и, следовательно, неизменность потенциалов в различных точках цепи.

Любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех проводников с током, называется **узлом**. При этом ток, входящий в узел, считается положительным, а ток, выходящий из узла, – отрицательным.

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

$$\sum_{i=1}^k I_i = 0 . \quad (7.28)$$

Например, для узла, изображенного на рис. 7.8 первое правило Кирхгофа запишется так:

$$I_1 - I_5 - I_4 + I_3 - I_2 = 0 . \quad (7.29)$$

Первое правило Кирхгофа вытекает из закона сохранения электрического заряда. Действительно, при установившемся режиме количество электричества, приходящего к узлу, должно равняться количеству электричества, уходящего от узла за то же время.

2. Второе правило Кирхгофа: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвлённой электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС \mathcal{E}_k , встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k . \quad (7.30)$$

Второе правило Кирхгофа получается из обобщённого закона Ома для разветвлённых цепей. При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:

1. Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи. Действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получится положительным, то его направление выбрано правильно, если отрицательным – его истинное направление противоположно выбранному.
2. Выбрать положительное направление обхода контура и строго его придерживаться. Произведение $I_i R_i$ положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода, и наоборот, ЭДС, действующее по выбранному направлению обхода, считается положительным, против – отрицательным.
3. Составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин (в систему уравнений должны входить все сопротивления и ЭДС рассматриваемой цепи). Каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах, иначе получатся уравнения, являющиеся простой комбинацией уже составленных.

В качестве примера рассмотрим контур, состоящий из трёх участков (рис. 7.9).

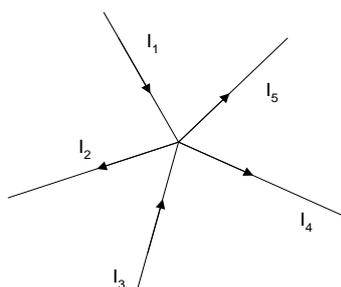


Рис. 7.8

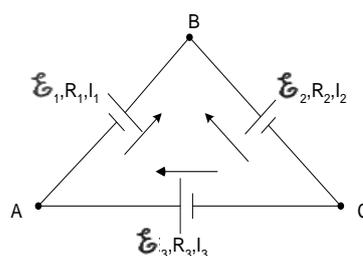


Рис. 7.9

Направление обхода по часовой стрелке примем за положительное, при этом отметим, что выбор этого направления совершенно произволен. Токи, совпадающие с направлением обхода контура, считаются положительными, не совпадающие с направлением обхода – отрицательными. ЭДС на участке цепи считается положительной, если оно повышает потенциал по направлению обхода контура (то есть по направлению обхода контура внутри источника приходится идти от отрицательного полюса к положительному), в противном случае ЭДС источника тока считается отрицательным.

Применяя к участкам закон Ома, получим: $I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$. (7.31)

Уравнение (7.31) выражает второе правило Кирхгофа.

Вопросы для самопроверки

1. Электрический ток. Постоянный электрический ток и его основные характеристики: сила тока и плотность тока.
2. Законы Ома и Джоуля-Ленца. Работа и мощность постоянного электрического тока.
3. Сопротивление проводника. Последовательное и параллельное соединения проводников.
4. Правила Кирхгофа для расчета электрических цепей постоянного тока.

§ 7.8 Примеры решения задач

Пример 7.1 Ламповый реостат состоит из 5 лампочек сопротивлением $r = 350 \text{ Ом}$, включенных параллельно. Найти сопротивление R реостата, когда:
а) горят все лампочки; б) вывинчивается одна, две, три, четыре лампочки.

Решение:

а) Если лампочки включены параллельно, то их общее сопротивление R находится по формуле $\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5}$. Так как сопротивления всех лампочек одинаковы и равны r ,

то $\frac{1}{R} = \frac{5}{r}$, откуда $R = \frac{r}{5} = 70 \text{ Ом}$.

б) Если выключить одну лампочку, то аналогично можно найти, что общее сопротивление цепи будет равно $R = \frac{r}{4} = 87,5 \text{ Ом}$; если две лампочки, то $R = \frac{r}{3} = 116,7 \text{ Ом}$;

если три лампочки – $R = \frac{r}{2} = 175 \text{ Ом}$; если четыре лампочки – $R = r = 350 \text{ Ом}$.

Ответ: а) $R = 70 \text{ Ом}$.

б) одну лампочку $R = 87,5 \text{ Ом}$; две лампочки $R = 116,7 \text{ Ом}$.
три лампочки $R = 175 \text{ Ом}$; четыре лампочки $R = 350 \text{ Ом}$.

Пример 7.2 Сколько витков нихромовой проволоки диаметром $d = 1 \text{ мм}$ надо намотать на фарфоровый цилиндр, чтобы получить сопротивление $R = 40 \text{ Ом}$?

Решение:

Сопротивление проводника можно рассчитать по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление (для нихрома $\rho = 200 \text{ мкОм/м}$),

l – длина проводника,

S – площадь его поперечного сечения.

Длина одного витка равна $l = 2\pi r$, тогда длина всей проволоки

$$l = N \cdot 2\pi r, \quad (2)$$

где N – количество витков.

Площадь поперечного сечения
$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (3)$$

Подставив (3) и (2) в (1), получим $R = \rho \frac{8Nr}{d^2}$, откуда $N = \frac{Rd^2}{8\rho r}$ или, подставив значения, получим $N = 200$. **Ответ:** $N = 200$.

Пример 7.3 В электрической цепи с э.д.с. $\mathcal{E} = 2 \text{ В}$ протекает ток $I = 0,25 \text{ А}$. Внутреннее сопротивление источника $r = 0,5 \text{ Ом}$. Найти падение напряжения внутри элемента и сопротивление внешней цепи.

Решение:

Падение напряжения внутри элемента $U_r = I r = 0,125 \text{ В}$. Согласно закону Ома для замкнутой

цепи сила тока $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, откуда $R = \frac{\mathcal{E}}{I} - r$. Подставив значения, получим $R = 7,5 \text{ Ом}$.

Ответ: $U_r = 0,125 \text{ В}$; $R = 7,5 \text{ Ом}$.

Пример 7.4 Ток в цепи, состоящей из элемента с ЭДС $\mathcal{E} = 6\text{ В}$ и внешнего сопротивления $R = 1,1\text{ Ом}$, равен $I = 3\text{ А}$. Найти падение потенциала U_r на внутреннем сопротивлении и его сопротивление r .

Решение:

Согласно второму закону Кирхгофа $U_r + IR = \mathcal{E}$, откуда $U_r = \mathcal{E} - IR$. Подставив значения, получим: $U_r = \mathcal{E} - IR = 2,7\text{ В}$. По закону Ома для участка цепи $I = \frac{U_r}{r}$, откуда

$$r = \frac{U_r}{I} = 0,9\text{ Ом}.$$

Ответ: $U_r = 2,7\text{ В}$, $r = 0,9\text{ Ом}$.

Пример 7.5 Имеются два одинаковых источника тока с ЭДС $\mathcal{E} = 2\text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,3\text{ Ом}$. Как надо соединить эти элементы (последовательно или параллельно), чтобы получить наибольший ток, если внешнее сопротивление: а) $R = 0,2\text{ Ом}$; б) $R = 16\text{ Ом}$?

Решение:

В соответствии с законом Ома для замкнутой цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$. Если элементы соединены последовательно, их эквивалентное сопротивление будет равно $2r$, а суммарная ЭДС равна $2\mathcal{E}$. Тогда $I_1 = \frac{2\mathcal{E}}{R+2r}$. При параллельном соединении их эквивалентное сопротивление равно $0,5r$, а суммарная ЭДС равна \mathcal{E} . Тогда $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R+0,5r}$. Подставив числовые данные, получим:

$$\text{а) } I_1 = 5\text{ А}, I_2 = 5,7\text{ А}; \quad \text{б) } I_1 = 0,24\text{ А}, I_2 = 0,124\text{ А}.$$

То есть, при маленьком внешнем сопротивлении элементы выгоднее соединять параллельно, а при большом – последовательно.

Ответ: а) $I_1 = 5\text{ А}$, $I_2 = 5,7\text{ А}$; б) $I_1 = 0,24\text{ А}$, $I_2 = 0,124\text{ А}$.

Пример 7.6 Два последовательно соединенных элемента с одинаковой ЭДС $\mathcal{E}_1 = 1,5\text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1\text{ Ом}$ и $r_2 = 1,5\text{ Ом}$ замкнуты на внешнее сопротивление $R = 0,5\text{ Ом}$. Найти разность потенциалов U на зажимах каждого элемента.

Решение:

По закону Ома для замкнутой цепи при последовательном соединении элементов сила тока в цепи равна

$$I = \frac{2\mathcal{E}}{R+r_1+r_2} = 1,33\text{ А}.$$

Разность потенциалов на зажимах первого элемента

$$U_1 = \mathcal{E} - Ir_1 = 0,66\text{ В}.$$

Разность потенциалов на зажимах второго элемента

$$U_2 = \mathcal{E} - Ir_2 = 0\text{ В}.$$

Ответ: $U_1 = 0,66\text{ В}$, $U_2 = 0\text{ В}$

Пример 7.7 Батареи имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = 2\text{В}$ и $\mathcal{E}_2 = 3\text{В}$, сопротивление $R_3 = 1,5\text{кОм}$, сопротивление амперметра $r_a = 0,5\text{кОм}$. Падение потенциала на сопротивлении R_2 равно $U_2 = 1\text{В}$ (ток через R_2 направлен сверху вниз). Найти показание амперметра.

Решение:

Выберем контур, направление обхода по нему и запишем для него уравнение по второму правилу Кирхгофа:

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = U_2 - I_3 R_3 - I_a r_a$$

Кроме того, по первому правилу Кирхгофа имеем: $I_1 = I_2 + I_a$. Отсюда, решая совместно эти уравнения, получим, что показание амперметра равно $I_a = \frac{U_2 - \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{R_3 + r_a}$.

Подставив значения, получим $I_a = 1\text{мА}$.

Ответ: $I_a = 1\text{мА}$.

Пример 7.8 Амперметр с сопротивлением $r_a = 0,18\text{Ом}$ предназначен для измерения токов до $I = 10\text{А}$, его шкала разделена на 100 делений. Какое сопротивление R надо взять и как его подключить, чтобы этим амперметром можно было измерять ток до $I_0 = 100\text{А}$? Как изменится при этом цена деления амперметра?

Решение:

Если необходимо измерить силу тока в n раз большую, чем можно измерить данным амперметром, т.е. $\frac{I_0}{I} = n = 10$, то следует параллельно подключить шунт с сопротивлением

$$R_{ш} = \frac{r_a}{n-1}. \text{ Таким образом, } R_{ш} = 0,02\text{Ом}. \text{ Цена деления без шунта равна } C_1 = \frac{10\text{А}}{100\text{дел}} = 0,1 \frac{\text{А}}{\text{дел}},$$

$$\text{а с шунтом} - C_2 = \frac{100\text{А}}{100\text{дел}} = 1 \frac{\text{А}}{\text{дел}}.$$

Ответ: $C_1 = 0,1 \frac{\text{А}}{\text{дел}}; \quad C_2 = 1 \frac{\text{А}}{\text{дел}}.$

Пример 7.9 В цепь включены последовательно медная и стальная проволоки одинаковой длины и диаметра. Найти: а) отношение теплоты, выделяющихся в этих проволоках, б) отношение падений напряжения на этих проволоках.

Решение:

При последовательном включении по медной и стальной проволоке течет одинаковый ток. Согласно закону Джоуля-Ленца на медной проволоке выделится количество теплоты

$$Q_1 = I^2 R_1 t = I^2 \rho_1 \frac{l}{S} t, \text{ а на стальной проволоке} - \text{ количество теплоты } Q_2 = I^2 R_2 t = I^2 \rho_2 \frac{l}{S} t.$$

$$\text{Отношение } \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = 0,71. \text{ Падение напряжения на медной проволоке } U_1 = IR_1 = I \rho_1 \frac{l}{S}.$$

$$\text{Падение напряжения на стальной проволоке } U_2 = IR_2 = I \rho_2 \frac{l}{S}. \text{ Отношение } \frac{U_1}{U_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = 0,17.$$

Ответ: $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = 0,71; \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = 0,17.$

Задачи для самостоятельной работы

Задача 7.1 Сила тока в проводнике равномерно нарастает от $I_0 = 10$ до $I = 15$ А в течение времени $t = 10$ с. Определить заряд, прошедший в проводнике. **Ответ:** $q = 15 \text{ Кл}$.

Задача 7.2 Определить плотность тока j в железном проводнике длиной $l = 10$ м, если провод находится под напряжением $U = 6$ В. **Ответ:** $j = 6.1 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Задача 7.3 Лампочка и реостат, соединенные последовательно присоединены к источнику тока. Напряжение U на зажимах лампочки равно 40 В, сопротивление R реостата равно 10 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность $P = 120$ Вт. Найти силу тока I в цепи. **Ответ:** $I = 2 \text{ А}$.

Задача 7.4 ЭДС ε батареи равна 20 В. Сопротивление R внешней цепи равно 2 Ом, сила тока $I = 4$ А. Найти КПД батареи. **Ответ:** $\eta = 0.4$.

Задача 7.5 К зажимам батареи аккумуляторов присоединен нагреватель. ЭДС батареи равна 24 В. Внутреннее сопротивление $r = 1$ Ом. Нагреватель, включенный в цепь, потребляет мощность 80 Вт. Вычислить силу тока I в цепи и КПД η нагревателя.

Ответ: $I_1 = 20 \text{ А}$; $\eta_1 = 0.17$; $I_2 = 4 \text{ А}$; $\eta_2 = 0.83$.

Задача 7.6 Сила тока в проводнике сопротивлением 100 Ом равномерно нарастает от 0 до 10 А в течение времени 30 с. Определите количество теплоты, выделившееся за это время в проводнике. **Ответ:** $Q = 100 \text{ кДж}$.

Задача 7.7 К источнику тока с ЭДС 1.5 В присоединили катушку сопротивлением 0.1 Ом. Амперметр показал силу тока, равную 0.5 А. Когда к источнику тока присоединили последовательно ещё один источник тока с такой же ЭДС, то сила тока в той же катушке оказалась равной 0.4 А. Определите внутреннее сопротивления первого и второго источников тока. **Ответ:** $r_1 = 2,9 \text{ Ом}$, $r_2 = 4,5 \text{ Ом}$

Задача 7.8 Обмотка электрического кипятильника имеет две секции. Если включена только первая секция, то вода закипает через 15 мин, если только вторая, то через 40 мин. Через сколько минут закипит вода, если обе секции включить параллельно? **Ответ:** $t = 10 \text{ мин}$.

Задача 7.9 По проводнику сопротивлением 3 Ом течёт ток, сила которого возрастает. Количество теплоты, выделившееся в проводнике за время 8 с, равно 200 Дж. Определите заряд, прошедший за это время по проводнику. В момент времени, принятый за начальный, сила тока в проводнике равна нулю. **Ответ:** $q = 20 \text{ Кл}$.

Задача 7.10 Три батареи с ЭДС $\varepsilon_1 = 12$ В, $\varepsilon_2 = 5$ В и $\varepsilon_3 = 10$ В и одинаковыми внутренними сопротивлениями r , равными 1 Ом, соединены между собой одноименными полюсами. Сопротивление соединительных проводов ничтожно мало. Определить силы токов I , идущих через каждую батарею. **Ответ:** $I_1 = 3 \text{ А}$; $I_2 = 4 \text{ А}$; $I_3 = 1 \text{ А}$.