

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И ЕГО ЗАКОНЫ

2.1. Основные понятия и определения

Электрический ток – упорядоченное движение зарядов в пространстве:

- *ток проводимости* – упорядоченное движение свободных зарядов, возникающее в проводнике или вакууме под действием электрического поля;
- *ток переноса (конвекционный ток)* – электрический ток, осуществляемый переносом электрических зарядов телами.

Направление электрического тока – направление движения положительных зарядов.

Мгновенная сила тока – отношение заряда dq , прошедшего через поперечное сечение проводника за бесконечно малый промежуток времени dt

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (2.1)$$

Постоянный ток – ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени

$$I = \frac{q}{t} = \text{const.} \quad (2.2)$$

Переменный электрический ток – электрический ток, изменяющийся во времени.

Периодический электрический ток – электрический ток, мгновенные значения которого повторяются через равные промежутки времени.

Плотность тока \vec{j} – вектор, направленный в сторону движения положительных зарядов и по модулю равный отношению

$$j = \frac{dI}{dS}, \quad (2.3)$$

где dS – элемент поверхности, перпендикулярный вектору \vec{j} ; dI – сила тока через элемент поверхности dS .

2.2 Диэлектрики, проводники и электроны проводимости

Диэлектриками или изоляторами называются вещества, не проводящие электрического тока. Обычно диэлектрики состоят из молекул, с которыми жестко связаны «свои» электроны. Внешнее электрическое поле, проникая в вещество, не отрывает электроны от молекул, которым они принадлежат. Электрически нейтральные молекулы остаются неизменными, но

положительные и отрицательные частицы, из которых они построены, смещаются вдоль поля в противоположных направлениях, образуя электрический диполь. Диэлектриками являются стекла, смолы, фарфор, каучук, эбонит, шелк, вода, керосин, газы и многие другие вещества.

Проводники - вещества, в которых под действием внешнего электрического поля возникает электрический ток. Все металлы - проводники. В них валентные электроны атомов обобществлены, т.е. не принадлежат определенным атомам. Они могут перемещаться по всему проводнику и, в этом смысле, являются *свободными*. В отсутствие приложенного к проводнику электрического поля свободные электроны (или *электроны проводимости*) движутся *хаотически*, часто сталкиваясь друг с другом и атомами в узлах кристаллической решетки, изменяя направления своего движения. Такое движение зарядов называют *тепловым*. Тепловое движение зарядов нельзя считать электрическим током, т.к. через любое сечение проводника за любой конечный промежуток времени в одну сторону проходит столько же электронов, сколько и в противоположную. Поэтому результирующий перенос заряда через это сечение равен нулю и электрический ток отсутствует.

Если проводник поместить в электрическое поле, то через любое сечение проводника, перпендикулярное силовым линиям этого поля, появится результирующий перенос электронов, отличный от нуля. Через это сечение по направлению поля электронов проходит меньше, чем в противоположном направлении, т.е. возникнет направленное движение электрических зарядов или электрический ток.

Направление, в котором происходит такой направленный дрейф электронов, противоположно направлению силовых линий электрического поля, которое совпадает с движением положительных зарядов в поле. *За направление тока принимают направление движения положительных зарядов.* Ток отрицательных зарядов (ток электронов) в определенном направлении эквивалентен току положительных зарядов в противоположном направлении. Под *электрическим током* имеют в виду так называемый *условный ток*, совпадающий по направлению с электрическими силовыми линиями.

Вопросы и задания для самопроверки

1. В чем отличие между диэлектриками и проводниками? Приведите примеры веществ, являющихся диэлектриками и проводниками.
2. Могут ли свободные электроны стать связанными, а связанные – свободными?
3. Какое движение зарядов называется хаотическим или тепловым? Почему тепловое движение зарядов нельзя считать электрическим током? Когда возникает направленное движение заряженных частиц? Чем отличается движение заряженных частиц в проводнике в отсутствие и при наличии внешнего электрического поля?
4. Направление движения каких зарядов в электрическом поле принимается за направление электрического тока?
5. Как соотносятся между собой направление движение электронов в электрическом поле и направление силовых линий этого поля?
6. Дайте определение электрического тока, мгновенной и постоянной силы тока. В чем отличие между этими понятиями?
7. Определите самостоятельно понятия средней силы тока и силы переменного тока.
8. Чем отличается постоянный электрический ток от переменного? Дайте математическую формулировку этим понятиям.

2.3. Электрическая цепь

Выясним *условия*, при выполнении которых в проводнике можно поддерживать постоянный электрический ток в течение некоторого времени. Очевидно, для возникновения направленного движения зарядов или электрического тока в проводнике необходимо на одном из его концов создать избыток зарядов, а на другом – недостаток. Предположим, что каким-то способом можно перебросить свободные заряды с одного конца проводника на другой, создав на нем их избыток. После такой переброски возникнет кратковременный электрический ток и вновь в проводнике установится равновесие зарядов.

Для поддержания электрического тока необходимо осуществлять постоянный и непрерывный перенос зарядов с одного конца проводника на другой. Такой процесс можно производить только с помощью некоторой внешней, *сторонней силы*, которая разделяет заряды и переносит их с одного конца проводника на другой по некоторому пути, лежащему вне его. Таким образом, для поддержания тока в проводнике необходима непрерывная циркуляция свободных зарядов, которая может осуществляться только по замкнутому контуру и поддерживаться сторонними силами. В дальнейшем «носитель» такой сторонней силы будет называться *источником электрической энергии, (тока) или генератором*.

Простейшая (элементарная) замкнутая электрическая цепь (рис. 2.1) состоит из внешнего проводника R (потребителя энергии) и источника электрической энергии (тока) \mathcal{E} .

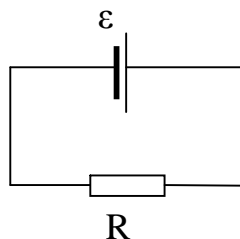


Рис. 2.1

Замкнутую электрическую цепь обычно делят на две существенно отличающиеся друг от друга части: *внешнюю и внутреннюю*. *Внешняя* – часть цепи, в которой заряды движутся **по направлению сил** электрического поля. *Внутренняя* – часть цепи, в которой заряды перемещаются под действием сторонних сил **против сил** электрического поля. Внутренняя цепь состоит из источника электрической энергии, а вся остальная часть цепи является внешней.

Электрическую цепь можно усложнить, вводя в нее дополнительные проводники. Точка, в которой соединено более двух проводников, называется *узлом*. Проводники, расположенные между двумя узлами, образуют отдельную *ветвь* цепи.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Дайте качественное объяснение причин существования электрического тока в замкнутой цепи и роли сторонней силы в этом явлении.
2. В чем отличие между внутренней и внешней частями электрической цепи?
3. Дайте определение узла и ветви электрической цепи.

4. Изобразите схему элементарной электрической цепи и усложните ее произвольным образом, вводя в схему дополнительные ветви.

2.4. Электродвижущая сила

Итак, для существования электрического тока в замкнутой цепи необходимо наличие в ней сторонних сил. Теперь рассмотрим более подробно физическую картину происходящего в электрической цепи и характеристические параметры «носителя» такой сторонней силы - источника тока. Для этого обратимся к условной схеме замкнутой цепи, изображенной на рис. 2.2

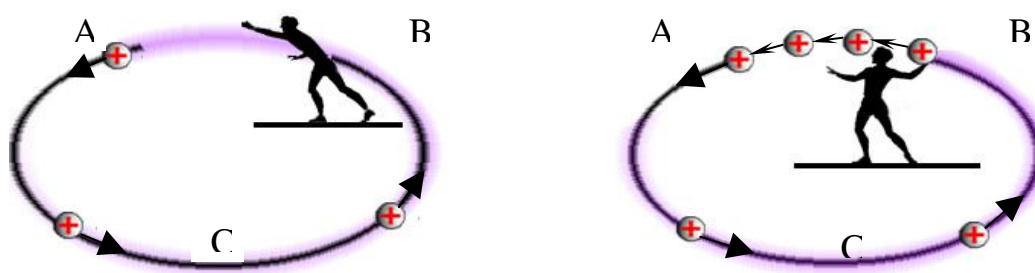


Рис. 2.2

На ней проводник представлен в виде части эллипса, а замыкающий его источник тока в виде человека, перебрасывающего заряды с одного конца проводника на другой. Если перебрасывание зарядов отсутствует, но концы проводника заряжены, то положительные заряды движутся из точки А в точку В по пути АСВ под действием существующего в нем электрического поля. Это поле создается в проводнике из-за разных зарядов на его концах, а соответствующие ему силовые линии внутри проводника принимают форму этого проводника, играющего направляющую роль как для силовых линий, так и для движущихся зарядов. Перемещение зарядов продолжается в направлении этих силовых линий до тех пор, пока поле внутри проводника не исчезнет, а потенциал во всех точках не станет одинаковым. Это заключение подтверждается результатами многочисленных экспериментов - *движение положительных зарядов из точки А в точку В продолжается до тех пор, пока их потенциалы не станут равными.*

Для поддержания тока в проводнике человек (*сторонняя сила*) должен непрерывно перебрасывать заряды из точки В в точку А. Обратите внимание – перебрасывание зарядов осуществляется против направления сил электрического поля (*внутри проводника заряды движутся по полю, вне проводника – против поля*). Для такого перебрасывания необходимо наличие сторонней силы (человек), которая совершает работу против сил электрического поля. Силы, перемещающие электрические заряды против сил электрического поля внутри источника тока, называются сторонними силами, а совершаемая ими работа $A_{ст}$ – работой сторонних сил. Осуществляющие разделение зарядов в источнике тока сторонние силы – силы не электростатического происхождения. Таким образом, внутри источника тока

сторонние силы совершают над зарядом работу по его перемещению против сил электрического поля, осуществляя ее запас. Запас работы представляет собой максимальную электрическую энергию заряда, позволяющую ему перемещаться вдоль цепи с одного конца проводника на другой.

(Сравните! Для того чтобы материальное тело имело возможность упасть с высоты h , его сначала необходимо поднять на эту высоту. Последнее можно произвести только с помощью сторонней силы, которая должна выполнить работу $A_{см} = mgh$ (m – масса тела; g – ускорение свободного падения) против силы тяжести mg . Совершая эту работу, сторонняя сила производит ее запас, который представляется как потенциальная энергия тела. Другой пример. Чтобы переместить незакрепленную точку пружины на расстояние x от положения равновесия, сторонняя сила должна совершить

работу $A_{см} = \frac{kx^2}{2}$ (k – коэффициент упругости пружины) против силы упругости. Только после этого тело, закрепленное на пружине, сможет перемещаться, осуществляя колебательный процесс).

Величина, характеризующая зависимость запасенной зарядом энергии в источнике тока (генераторе) от механизмов, осуществляющих разделение и перенос зарядов в нем, называется *электродвижущей силой* (эдс) и представляет собой отношение

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q}, \quad (2.4)$$

равное работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри источника (генератора).

Если источник тока разомкнут, т.е. проводник отсутствует, то в результате действия на заряды внутри источника сторонних сил, в точке А накапливаются положительные заряды, а в точке В – отрицательные. Это приводит к возникновению электрического поля с разностью потенциалов $\Delta\varphi$ между точками А и В. Поскольку электрические и сторонние силы внутри источника действуют на заряды в противоположных направлениях, накопление зарядов в точках А и В прекращается, когда эти силы становятся равными, т.е. когда $\Delta\varphi$ достигает наибольшей величины для данного источника. Можно доказать, что, когда источник разомкнут, то разность потенциалов $\Delta\varphi$ совпадает с его эдс ε .

При замыкании источника проводником в нем возникает электрическое поле и заряды приходят в движение в направлении этого поля. Возникший электрический ток приводит к уменьшению разности потенциалов между точками А и В. Однако действующие сторонние силы между этими точками внутри источника не дают выровняться их потенциалам и поддерживают ток в цепи, непрерывно совершая работу против сил электрического поля и сообщая зарядам энергию.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какие силы называют сторонними? Почему накопление разноименных зарядов на полюсах источника может происходить только под действием сторонних сил?
2. Дайте определение эдс. Объясните роль источника тока в электрической цепи.
3. ЭДС источника тока – силовая или энергетическая характеристика. Ответ обоснуйте.

4. Может ли происходить направленное движение зарядов между двумя точками проводника с равными потенциалами?
5. Почему в цепи постоянного тока разность потенциалов между двумя ее различными точками остается неизменной величиной?
6. Почему разность потенциалов между полюсами источника тока, замкнутого проводником, меньше эдс?
7. При каком условии разность потенциалов между полюсами источника совпадает с его эдс?
8. Средняя скорость направленного движения электронов в металлических проводниках очень мала (обычно несколько сантиметров или миллиметров в секунду). Как объяснить, что электрическая лампа в цепи зажигается одновременно с поворотом выключателя (в момент замыкания цепи)?
9. Внимательно обдумайте и объясните аналогию между работой внешней силы, поднимающей тело на некоторую высоту, работой силы сжимающей или растягивающей пружину и эдс источника тока в электрической цепи.

2.5. Законы Ома

Взаимосвязь между параметрами электрической цепи экспериментально установил в 1826 г немецкий ученый Георг Ом (1787 – 1854 гг.).

2.5.1. Закон Ома для участка цепи без эдс

Основной закон постоянного тока – закон Ома, являющийся обобщением данных опыта, утверждает, что сила тока в проводнике пропорциональна разности потенциалов между его концами (рис.2.3)

$$I \sim (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2.5)$$

где φ_1, φ_2 - значения потенциалов на концах этого участка.

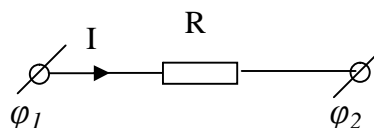


Рис. 2.3

Разность потенциалов между произвольными точками проводника обозначается буквой $U = \varphi_1 - \varphi_2$ и называется *напряжением*. Вводя в формулу (2.5) коэффициент пропорциональности g между током и напряжением, представим ее в виде

$$I = g(\varphi_1 - \varphi_2) = gU. \quad (2.6)$$

Коэффициент g называется *проводимостью* проводника, обратная величина R – его *сопротивлением*

$$R = \frac{1}{g}.$$

С учетом сказанного представим соотношение (2.6) в форме

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.7)$$

Зависимость $I = f(U)$ силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения называется *вольт-амперной характеристикой* проводника.

Перепишем соотношение (2.7) в другом виде

$$U = IR. \quad (2.8)$$

Выясним физический смысл последней формулы. Для этого вспомним, что *напряжение (разность потенциалов) на участке цепи численно равно работе, совершаемой электрическим полем (электрическими силами) при перемещении вдоль него единичного заряда*. Следовательно, левая часть формулы (2.8) представляет собой *работу*, совершаемую электрическим полем при перемещении по проводнику единичного заряда, которая является мерой увеличения его кинетической энергии. Правая же часть указывает, что потребителем этой энергии является проводник, перемещаясь по которому, кинетическая энергия зарядов тратится на преодоление его сопротивления и, как следствие, происходит повышение температуры проводника и выделение тепла. Соотношение (2.8) – частная форма закона сохранения энергии: *количество энергии, полученное зарядами от электрического поля, идет на преодоление сопротивления, т.е. производство теплоты*. Проводник, в котором не действуют сторонние силы, называется *однородным*.

Согласно определению (2.2), сила электрического тока измеряется в *амперах* (А): $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$. За единицу сопротивления в системе СИ принимается *Ом*. Ом – сопротивление проводника, по которому протекает ток в один ампер при напряжении на его концах в один вольт. Единица проводимости – *сименс* (Сим). Сименс – проводимость проводника, имеющего сопротивление один Ом.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи и объясните физический смысл определяющих его понятий: напряжения, силы тока и сопротивления.
2. Дайте формальное определение проводимости и сопротивления проводника.
3. Какую физическую величину называют напряжением на данном участке цепи? Дайте энергетическую характеристику этого физического параметра.
4. Дайте интерпретацию закона Ома как частной формулировки закона сохранения энергии.
5. Схематически представьте вольт-амперную характеристику металлического проводника. Как на основании этого графика найти сопротивление проводника?

Примеры решения задач

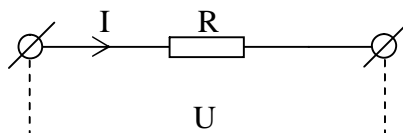
Задача 2.1

Электрический обогреватель сопротивлением $R = 40 \text{ Ом}$ включен в сеть с напряжением $U = 220 \text{ В}$. Найти силу I тока, протекающую через обогреватель.

Дано: $R = 40 \text{ Ом}$;

$U = 220 \text{ В}$.

Найти: I .



На рис. представлена электрическая схема задачи. Для ее решения воспользуемся законом Ома для однородного участка цепи в форме (2.7)

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

Подставляя в эту формулу численные значения параметров, определенных условиями задачи, получим значение силы тока, протекающего через обогреватель

$$I = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ A}.$$

Ответ: через обогреватель протекает ток силой $I = \frac{U}{R} = 5,5 \text{ A}$.

Задача 2.2

Через сопротивление R_1 при напряжении U_1 на нем протекает ток $I_1 = 10 \text{ A}$. Найти сопротивление R_1 и напряжение U_1 , если при увеличении напряжения на этом участке цепи на $\Delta U = 8 \text{ В}$ ток в цепи возрастает на $\Delta I = 2 \text{ A}$.

Дано: $I_1 = 10 \text{ A}$;
 $\Delta U = 8 \text{ В}$;
 $\Delta I = 2 \text{ A}$.
 Найти: R_1 , U_1 .

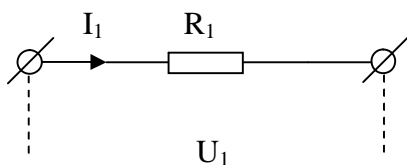


Рис.1

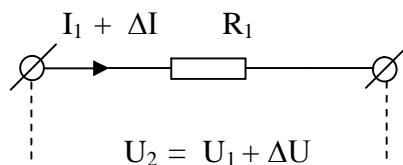


Рис.2

Используя закон Ома для участка цепи, можно составить систему уравнений для решения задачи.

$$\begin{cases} U_1 = I_1 R_1 & \text{- закон Ома для участка цепи (рис.1);} \\ U_1 + \Delta U = (I_1 + \Delta I) R_1 & \text{- закон Ома для участка цепи (рис.2);} \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

В этой системе уравнений две неизвестные величины - U_1 и R_1 . Уравнение (2) с учетом (1) перепишем в виде

$$\Delta U = \Delta I R_1 \quad (3)$$

Отсюда получим выражение для сопротивления на участке цепи

$$R_1 = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (4)$$

Подставляя последнее выражение в соотношение (1) найдем напряжение на участке цепи

$$U_1 = \Delta U \frac{I_1}{\Delta I}. \quad (5)$$

Подставляя в формулы (4) и (5) значения параметров, получим численные значения неизвестных величин.

Ответ: $R_1 = \frac{\Delta U}{\Delta I} = 4 \text{ Ом}$, $U_1 = \Delta U \frac{I_1}{\Delta I} = 40 \text{ В}$.

2.5.2. Сопротивление проводника

Согласно классическим представлениям, при наличии тока в проводнике свободные электрические заряды в нем одновременно с направленным движением принимают участие и в хаотическом тепловом движении. Сталкиваясь с атомами (молекулами или ионами), образующими кристаллическую решетку проводника, свободные электрические заряды отдают им часть кинетической энергии, которую они приобретают, разгоняясь в электрическом поле, созданном источником электрической энергии. Движение атомов в узлах кристаллической решетки при этом становится интенсивнее (повышается температура проводника!). Таким образом, заряженные частицы теряют часть приобретенной ими энергии, что эквивалентно совершению работы силами сопротивления среды. Это означает, что в проводнике существует сопротивление электрическому току. Иначе говоря, электрический ток выполняет работу, преодолевая сопротивление проводника. В простейшей электрической цепи вся электрическая энергия расходуется на нагревание проводника.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Определите физический смысл сопротивления проводника. Сопротивление – характеристика проводника или электрической цепи?
2. Может ли сопротивление проводника зависеть от его температуры, длины, площади поперечного сечения, концентрации зарядов, их геометрических размеров, влажности окружающей среды?
3. Как связаны между собой проводимость и сопротивление проводника? В каких единицах измеряются эти физические параметры?
4. Почему при увеличении температуры возрастает число столкновений электронов с атомами кристаллической решетки?

Зависимость сопротивления от геометрических параметров проводника, его материала и температуры

Рассмотрим цилиндрический металлический проводник длиной L , площадью поперечного сечения S (рис.2.4) и концентрацией заряженных частиц n (число частиц в единице объема). Пусть v – средняя скорость направленного движения зарядов; τ – среднее время их движения с этой скоростью между двумя столкновениями с узлами кристаллической решетки.

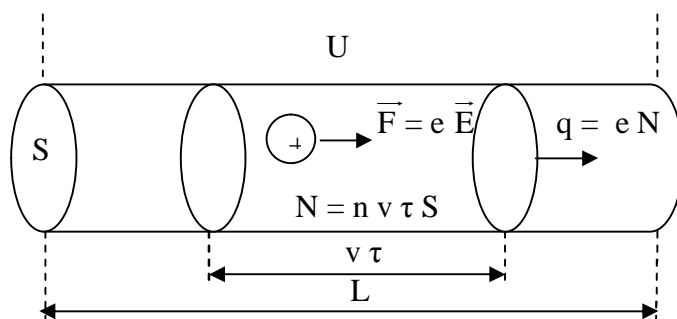


Рис.2.4

Тогда через поперечное сечение S проводника за время τ пройдут все частицы, находящиеся в цилиндре, длина которого $v\tau$. Число этих частиц N равно произведению их концентрации n на объем цилиндра $V = v\tau S$, т.е

$$N = n V = n v \tau S. \quad (2.9)$$

Следовательно, за время τ через поперечное сечение проводника проходит заряд

$$q = e N = e n v \tau S, \quad (2.10)$$

и сила тока в проводнике, согласно формуле (2.2), определяется соотношением

$$I = \frac{q}{\tau} = e n v S. \quad (2.11)$$

(Обратите внимание, что сила тока пропорциональна площади поперечного сечения проводника, т.е. $I \sim S$. Это связано с тем, что с увеличением площади возрастает число зарядов, проходящих через нее в ед. времени.) Значение скорости v , входящее в последнюю формулу, определим, учитывая, что частица в течение времени τ разгоняется электрическим полем, т.е движется равноускоренно с ускорением a

$$v = a \tau. \quad (2.12)$$

Используя второй закон Ньютона,

$$F = m a, \quad (2.13)$$

где

$$F = e E; \quad E = \frac{U}{L} \quad \rightarrow \quad F = e \frac{U}{L},$$

найдем значение ускорения

$$a = \frac{e U}{m L}. \quad (2.14)$$

Подставляя формулу (2.14) в (2.12)

$$v = \frac{e U}{m L} \tau \quad (2.15)$$

и это значение скорости в (2.11), получим выражение для силы тока

$$I = \frac{n e^2 \tau}{m} \cdot \frac{S}{L} \cdot U. \quad (2.16)$$

Сравнивая последнюю формулу с (2.7), определим сопротивление проводника

$$R = \frac{m}{n e^2 \tau} \cdot \frac{L}{S}. \quad (2.17)$$

Если теперь ввести обозначение

$$\rho = \frac{m}{n e^2 \tau}, \quad (2.18)$$

то соотношение (2.17) можно переписать в виде

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}. \quad (2.19)$$

Эта формула выражает зависимость электрического сопротивления проводника от его геометрических размеров (длины L и площади поперечного сечения S). Зависимость сопротивления проводника от его свойств определяет коэффициент ρ , т.к. физические параметры n и τ являются характеристиками вещества. Коэффициент ρ - удельное сопротивление, т.е. сопротивление цилиндрического проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м². Размерность удельного сопротивления Ом·м. Эти утверждения следуют из формулы (2.19).

Электрическое сопротивление проводника увеличивается с возрастанием температуры, т.к. последнее приводит к росту амплитуды колебаний частиц в узлах кристаллической решетки и вероятности столкновения с ними направленно движущихся зарядов. Это ведет к уменьшению среднего времени τ перемещения частиц в поле без столкновений и увеличению ρ (см. формулу 2.18). Экспериментально установленная зависимость удельного сопротивления от температуры имеет вид

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (2.20)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление при 0⁰С; α - термический коэффициент сопротивления, зависящий от свойств проводника; $t = t^0$ С – температура в градусах Цельсия. Умножая обе части формулы (2.20) на отношение $\frac{L}{S}$ и учитывая формулу (2.19), для сопротивления проводника имеем

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.21)$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0⁰С. Соотношения (2.20), (2.21) с хорошей точностью выполняются только в высокотемпературной области. В области низких температур сопротивления проводников являются существенно нелинейными функциями.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Дайте определение концентрации n зарядов в проводнике и среднего времени τ движения частиц между двумя столкновениями с узлами кристаллической решетки.

2. Дайте качественное объяснение зависимости τ от температуры. Почему с уменьшением τ сопротивление проводника возрастает?
3. Как изменится сопротивление проводника, если τ возрастет вдвое (уменьшится вдвое)?
4. На каких временных интервалах направленное движение электрических зарядов в однородном проводнике можно считать равноускоренным?
5. Выведите зависимости силы тока от геометрических и характеристических параметров проводника (формулы (2.11) и (2.16)).
6. Дайте определение удельного сопротивления ρ проводника и выразите его сопротивление R через удельное сопротивление и геометрические параметры (формула (2.19)).
7. Используя формулу (2.19), определите размерность удельного сопротивления ρ .
8. Представьте графически зависимость (2.21) $R = R(t)$ и объясните, как по экспериментальному графику этой зависимости определить значения параметров R_0 и α .
9. Дайте определение температурного коэффициента сопротивления α . В каких единицах измеряется этот физический параметр?

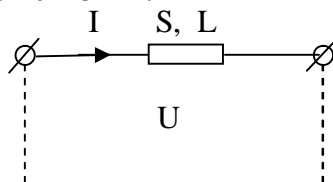
Примеры решения задач

Задача 2.3

Найти напряжение U между концами алюминиевого провода длиной $L = 500$ м и площадью поперечного сечения $S = 14 \text{ мм}^2$, если в нем протекает ток силой $I = 15$ А. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Дано: $L = 500 \text{ м}$;
 $S = 14 \text{ мм}^2$;
 $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
 $I = 15 \text{ А}$.

Найти: U .



Для решения задачи составим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{ll} U = I R & \text{– закон Ома для участка цепи;} \quad (1) \\ R = \rho \frac{L}{S} & \text{– сопротивление алюминиевого провода;} \quad (2) \end{array} \right.$$

Падение напряжения в алюминиевом проводе найдем, подставив сопротивление (2) в соотношение (1)

$$U = I \rho \frac{L}{S}.$$

Теперь, используя значения параметров, определенных условиями задачи, получим численное значение напряжения, представленное в ответе.

Ответ: $U = I \rho \frac{L}{S} = 15 \text{ В}$.

Задача 2.4

Найти температуру t_2 вольфрамовой нити лампочки, если при включении в сеть с напряжением $U = 220 \text{ В}$ по ней идет ток $I = 0,68 \text{ А}$. При температуре $t_1 = 20^\circ \text{C}$ сопротивление нити $R_1 = 36 \text{ Ом}$. Температурный коэффициент сопротивления вольфрама $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Дано: $U = 220 \text{ В};$
 $I = 0,68 \text{ А};$
 $t_1 = 20^\circ \text{ С};$
 $R_1 = 36 \text{ Ом};$
 $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$

Найти: $t_2.$

Учитывая, что зависимость сопротивления цилиндрического металлического проводника от температуры имеет вид

$$R = R_0 (1 + \alpha t),$$

где R_0 - сопротивление проводника при 0°С , t - температура в градусах Цельсия, α - температурный коэффициент сопротивления, можно составить систему уравнений для решения задачи:

$$\left\{ \begin{array}{ll} R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1) & \text{- сопротивление проводника при температуре } t_1; \quad (1) \\ R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2) & \text{- сопротивление проводника при температуре } t_2; \quad (2) \\ U = I R_2 & \text{- напряжение на проводнике при температуре } t_2; \quad (3) \end{array} \right.$$

Если теперь разделить правые и левые части уравнений (1) и (2)

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}; \quad 4.$$

и в это соотношение подставить явное выражение сопротивления $R_2 = \frac{U}{I}$ из (3), то получим уравнение относительно неизвестной величины t_2

$$\frac{U}{I R_1} = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1},$$

которое перепишем в виде

$$1 + \alpha t_2 = \frac{U}{I R_1} (1 + \alpha t_1).$$

Отсюда получим аналитическое выражение для неизвестной величины t_2

$$t_2 = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{U}{I R_1} (1 + \alpha t_1) - 1 \right).$$

После подстановки в последнюю формулу значений параметров, найдем численное значение температуры t_2 , представленное в ответе.

Ответ: температура вольфрамовой нити лампочки $t_2 = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{U}{I R_1} (1 + \alpha t_1) - 1 \right) = 1916^\circ \text{С}.$

2.5.3. Типы соединения проводников

При включении в цепь проводники можно соединять друг с другом различными способами. Существует три вида соединений: *последовательное* (рис.2.5), *параллельное* (рис.2.6) и *смешанное* (рис.2.7). Прежде чем рассмотреть более подробно каждое из них, введем понятие эквивалентного сопротивления. *Сопротивление, при включении которого вместо всех проводников, находящихся между двумя точками цепи, ток и напряжение между ними остаются неизменными, называется эквивалентным сопротивлением этого участка цепи.*

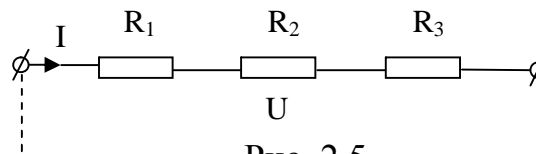


Рис. 2.5

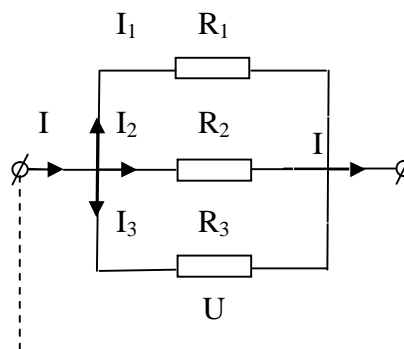


Рис. 2.6

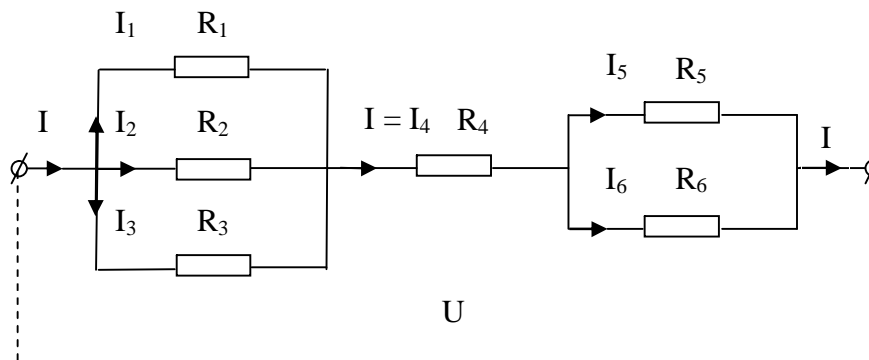


Рис. 2.7

Вопросы и задания для самопроверки

1. Найдите отличия последовательного, параллельного и смешанного соединений друг от друга.
2. Изобразите схематически различные типы соединения проводников, отличные от представленных на рис. 2.5 – 2.7. Укажите на них узлы и ветви.
3. Дайте определение эквивалентному сопротивлению и изобразите схематически эквивалентные схемы, представленным на рис. 2.5 – 2.7 участкам цепи.

Последовательное соединение сопротивлений

Последовательным называется соединение сопротивлений, при котором конец предыдущего сопротивления соединяют с началом следующего (рис.2.5). Если ветвь, изображенная на рис. 2.5, является участком цепи постоянного тока, то сила тока в каждом из сопротивлений одинакова

$$I_1 = I_2 = I_3 = I. \quad (2.22)$$

В противном случае в различных точках цепи происходило бы накопление электрических зарядов, изменение потенциалов и электрический ток в цепи не мог бы быть постоянным.

Если между крайними точками участка цепи на рис.2.5 приложено напряжение U , то при перемещении заряда q с одного конца цепи на другой электрическое поле совершает работу

$$A = q U. \quad (2.23)$$

С другой стороны, если на каждом из сопротивлений напряжения U_1, U_2, U_3 , то при перемещении заряда q через каждое из сопротивлений электрическое поле совершает работу

$$A_1 = q U_1, \quad A_2 = q U_2, \quad A_3 = q U_3. \quad (2.24)$$

Согласно закону сохранения энергии (энергия – аддитивная величина) выполняется равенство

$$A = A_1 + A_2 + A_3.$$

Подставляя в последнее соотношение формулы (2.23) и (2.24), окончательно имеем

$$U = U_1 + U_2 + U_3, \quad (2.25)$$

т.е. при последовательном соединении проводников напряжение на участке цепи равно сумме напряжений на каждом из отдельных участков этой же цепи.

Теперь выясним, как определить эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{ЭКВ}} = R$$

участка цепи, представленного на рис.2.5. Для этого воспользуемся законом Ома в форме (2.8) и запишем напряжение для всего участка цепи

$$U = I R \quad (2.26)$$

и для его частей, т.е. на каждом сопротивлении

$$U_1 = I R_1, \quad U_2 = I R_2, \quad U_3 = I R_3. \quad (2.27)$$

Подставляя формулы (2.26) и (2.27) в соотношение (2.25), окончательно имеем

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (2.28)$$

Таким образом, при последовательном соединении эквивалентное сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений отдельных ее участков. Из соотношения (2.28) следует, что последовательное включение в эту цепь нового проводника приводит к увеличению сопротивления участка цепи.

Отметим, что при размыкании цепи с последовательно соединенными проводниками в любой ее точке, ток прекращается одновременно во всей цепи. Поэтому последовательное соединение потребителей электрической энергии не всегда удобно.

Вопросы и задания для самопроверки

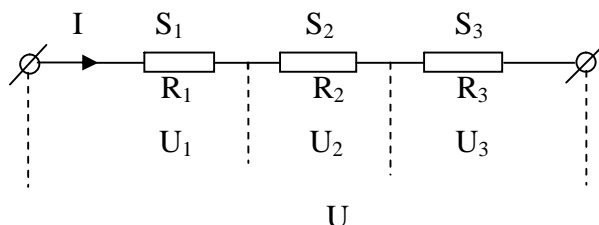
1. Какое соединение проводников называется последовательным?
2. Почему при последовательном соединении проводников и токе в цепи не зависящем от времени, сила тока в каждом проводнике одинакова?
3. Какие физические величины сохраняются при последовательном соединении проводников?
4. Дайте обоснование утверждению «при последовательном соединении проводников напряжение на участке цепи равно сумме напряжений на каждом из отдельных участков этой же цепи» как частной форме закона сохранения энергии.
5. Выведите формулы для эквивалентного сопротивления и эквивалентной проводимости n последовательно соединенных проводников R_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и их частные формы, когда все проводники одинаковы $R_i = R_0$.
6. Показать, что при последовательном включении в цепь нового проводника происходит увеличение эквивалентного сопротивления этого участка цепи.
7. Дайте обоснование утверждению, что последовательное соединение потребителей электрической энергии не всегда удобно и приведите примеры.

Примеры решения задач

Задача 2.5

Электрическая цепь состоит из трех последовательно соединенных отрезков провода, изготовленных из материала с удельным сопротивлением $\rho = 9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, имеющих одинаковую длину $L = 1$ м, но разные сечения: $S_1 = 1$ мм², $S_2 = 2$ мм², $S_3 = 3$ мм². Найти силу тока I в цепи, сопротивления R_1 , R_2 и R_3 каждого отрезка и сопротивление R всего провода, а также напряжения U_1 , U_2 и U_3 на этих отрезках, если напряжение на концах цепи $U = 11$ В.

Дано: $U = 11$ В;
 $\rho = 9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;
 $L = 1$ м;
 $S_1 = 1$ мм²; $S_2 = 2$ мм²;
 $S_3 = 3$ мм².



Найти: I , R_1 , R_2 , R_3 , R , U_1 , U_2 , U_3 .

Система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} I = \frac{U}{R} & \text{– закон Ома для участка цепи;} \quad (1) \\ U = U_1 + U_2 + U_3 & \text{– напряжение на участке цепи} \quad (2) \\ R = R_1 + R_2 + R_3 & \text{при последовательном соединении сопротивлений;} \quad (3) \\ R_i = \rho \frac{L}{S_i} \quad (i = 1, 2, 3) & \text{– сопротивление } i\text{-го отрезка участка цепи;} \quad (4) \\ U_i = I \rho \frac{L}{S_i} \quad (i = 1, 2, 3) & \text{– напряжение на } i\text{-ом отрезке участка цепи;} \quad (5) \end{array} \right.$$

Из соотношения (5) получим следующие отношения напряжений

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{S_1}{S_2}; \quad \frac{U_3}{U_1} = \frac{S_1}{S_3}.$$

Отсюда имеем

$$U_2 = U_1 \frac{S_1}{S_2}; \quad U_3 = U_1 \frac{S_1}{S_3}. \quad (6)$$

Теперь подставим (6) в соотношение (2)

$$U = U_1 \left(1 + \frac{S_1}{S_2} + \frac{S_1}{S_3} \right) \quad (7)$$

и из последнего равенства получим напряжение на первом отрезке цепи

$$U_1 = U \frac{S_2 S_3}{S_1 S_2 + S_1 S_3 + S_2 S_3}.$$

Теперь используя соотношения (6), найдём напряжения на двух других отрезках цепи

$$U_2 = U \frac{S_1 S_3}{S_1 S_2 + S_1 S_3 + S_2 S_3}; \quad U_3 = U \frac{S_1 S_2}{S_1 S_2 + S_1 S_3 + S_2 S_3}.$$

Сопротивления отдельных отрезков цепи и ее полное сопротивление определяется формулами (4) и (3). Последняя формула после подстановки в неё сопротивлений отдельных отрезков (4) принимает вид

$$R = \rho L \frac{S_1 S_2 S_3}{S_1 S_2 + S_1 S_3 + S_2 S_3}. \quad (9)$$

Подставляя полное сопротивление цепи (9) в формулу (1), получим аналитическое выражение для силы тока в цепи

$$I = \frac{U}{\rho L} \cdot \frac{S_1 S_2 S_3}{S_1 S_2 + S_1 S_3 + S_2 S_3}.$$

Численные величины, полученные после подстановки соответствующих параметров задачи в формулы (1), (3), (4), (5), представлены в ответе.

Ответ: $I = 67 \text{ A}$; $R_1 = 9 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}$; $R_2 = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$; $R = 0,165 \text{ Ом}$;
 $U_1 = 6 \text{ В}$; $U_2 = 3 \text{ В}$; $U_3 = 2 \text{ В}$.

Параллельное соединение сопротивлений

Параллельным называется соединение сопротивлений, при котором начала сопротивлений образуют один узел, а их концы – другой (рис.2.6). Поскольку начала всех сопротивлений представляют собой единый узел, то все они имеют одинаковый потенциал, а их концы, образующие второй узел – другой потенциал, то напряжения на сопротивлениях удовлетворяют соотношению

$$U_1 = U_2 = U_3 = U, \quad (2.29)$$

т.е. при параллельном соединении напряжения на каждой из ветвей и на всем разветвлении одинаковы.

При постоянном токе в узлах электрической цепи заряды не накапливаются и не уничтожаются. Это означает, что сколько зарядов в единицу времени в узел приходит, столько же его и покидает, т.е.

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2.30)$$

Последнее соотношение, означает, что при параллельном соединении ток до разветвления равен сумме токов в его отдельных ветвях.

Теперь выясним, как эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{экв}} = R \quad (2.31)$$

определяется через сопротивления участка цепи, представленного на рис.2.6. Для этого воспользуемся законом Ома в форме (2.7) и запишем напряжение для участка цепи между узлами

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.32)$$

и для каждой ветви отдельно

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}. \quad (2.33)$$

Подставляя формулы (2.32) и (2.33) в соотношение (2.30), окончательно имеем

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (2.34)$$

Таким образом, при параллельном соединении обратная величина эквивалентного сопротивления всей цепи равна сумме обратных сопротивлений отдельных ее участков. Из соотношения (2.34) следует, что

параллельное включение в эту цепь нового проводника приводит к уменьшению эквивалентного сопротивления участка цепи.

Отметим, что при параллельном соединении проводников размыкание цепи в одной из ветвей не препятствует прохождению тока по другим ветвям. Если напряжение при этом не изменяется, то ток в каждой из оставшихся ветвей не зависит от токов в остальных ветвях и потребители не испытывают неудобств при отключении одной из ветвей цепи. Поэтому для них часто удобнее именно параллельное, а не последовательное соединение сопротивлений.

Вопросы и задания для самопроверки

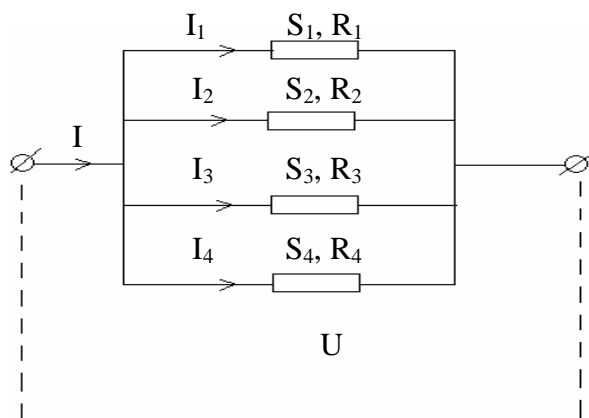
1. Какое соединение проводников называется параллельным?
2. Чем отличается параллельное соединение проводников от последовательного?
3. Какие физические величины сохраняются при параллельном соединении проводников?
4. Почему при постоянном токе в узлах электрической цепи заряды не накапливаются и не уничтожаются?
5. Как найти эквивалентное сопротивление участка цепи с параллельно соединенными сопротивлениями?
6. Показать, что при параллельном включении в цепь нового проводника происходит уменьшение эквивалентного сопротивления этого участка цепи.
7. Назовите причины по которым параллельное соединение проводников оказывается удобнее последовательного.

Примеры решения задач

Задача 2.6

Электрическая цепь составлена из четырех отрезков провода одинаковой длины и изготовленных из одинакового материала, соединенных параллельно. Сечение каждого из отрезков различно: $S_1 = 1 \text{ мм}^2$, $S_2 = 2 \text{ мм}^2$, $S_3 = 3 \text{ мм}^2$, $S_4 = 4 \text{ мм}^2$. Определить силу тока в каждом проводнике, если полный ток в цепи $I = 100 \text{ А}$.

Дано: $I = 100 \text{ А}$;
 $S_1 = 1 \text{ мм}^2$; $S_2 = 2 \text{ мм}^2$;
 $S_3 = 3 \text{ мм}^2$; $S_4 = 4 \text{ мм}^2$.
 Найти: I_1 , I_2 , I_3 , I_4 .



Система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} I = I_1 + I_2 + I_3 & \text{- ток в разветвлённой цепи (см.рис);} \quad (1) \\ I_i = \frac{U}{R_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) & \text{- закон Ома для участка цепи;} \quad (2) \\ R_i = \frac{L}{S_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) & \text{- сопротивление отдельного отрезка цепи;} \quad (3) \end{array} \right.$$

Из соотношения (2) получим отношения

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2}, \quad \frac{I_3}{I_1} = \frac{R_1}{R_3}, \quad \frac{I_4}{I_1} = \frac{R_1}{R_4}. \quad (4)$$

Воспользовавшись явным выражением для сопротивлений (3), из (4) имеем

$$I_i = I_1 \frac{S_i}{S_1}, \quad (i = 2, 3, 4). \quad (5)$$

Теперь подставим (5) в соотношение (1)

$$I = I_1 \left(1 + \frac{S_2}{S_1} + \frac{S_3}{S_1} + \frac{S_4}{S_1} \right).$$

и отсюда получим силу тока в первом отрезке цепи

$$I_1 = I \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}.$$

Используя соотношение (5), найдем ток в остальных отрезках цепи. Общая формула силы тока имеет вид

$$I_i = I \frac{S_i}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}; \quad (i = 1, 2, 3, 4).$$

Подставляя в последнюю формулу значения известных параметров, определённых условием задачи, найдём численные значения токов в каждом проводнике.

Ответ: $I_1 = 10 \text{ A}$; $I_2 = 20 \text{ A}$; $I_3 = 30 \text{ A}$; $I_4 = 40 \text{ A}$.

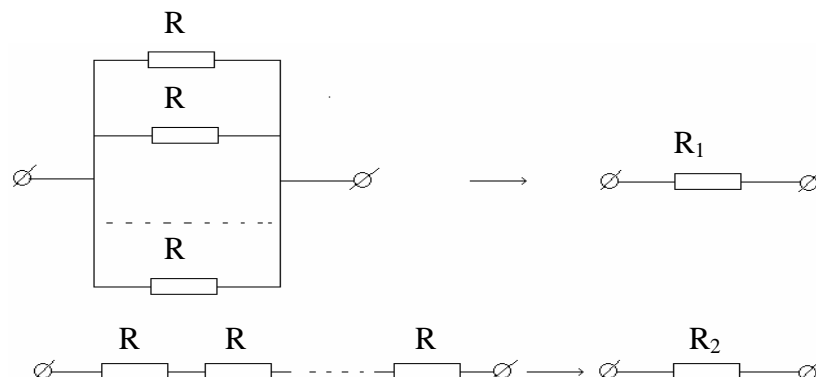
Задача 2.7

Эквивалентное сопротивление нескольких параллельно соединённых одинаковых проводников $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$, а при их последовательном соединении - $R_2 = 10 \text{ Ом}$. Найти количество n проводников и сопротивление R отдельного проводника.

Дано: $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$;

$R_2 = 10 \text{ Ом}$.

Найти: n , R .



Система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R} = \frac{n}{R} \end{array} \right. \quad \text{– формула для эквивалентного сопротивления;} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_2 = R + R + R + \dots + R = n R \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{при параллельном соединении проводников;} \\ \text{– формула для эквивалентного сопротивления} \end{array} \quad (2)$$

при последовательном соединении проводников.

Перепишем систему уравнений (1,2) в другом виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = n R_1, \\ R = \frac{R_2}{n}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Приравняв правые части уравнений (3) и (4), получим уравнение для нахождения количества проводников n .

$$n R_1 = \frac{R_2}{n}. \quad (5)$$

Отсюда имеем

$$n = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}. \quad (6)$$

Подставляя (5) в любое из соотношений (3,4), найдём сопротивление отдельного проводника

$$R = \sqrt{R_1 \cdot R_2}.$$

Ответ: $n = 2$; $R = 5$ Ом.

2.5.4. Закон Ома для замкнутой цепи с сосредоточенной эдс

Пусть имеется замкнутая цепь с одним источником электрической энергии эдс которого ε , внутреннее сопротивление r и металлическим проводником с сопротивлением R (рис.2.8)

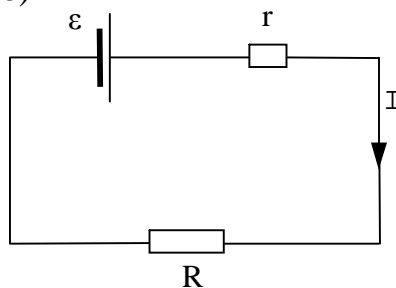


Рис. 2.8

Сопротивление подводящих проводов для простоты рассмотрения учитывать не будем. В этом случае эдс сосредоточена лишь на небольшом участке цепи, и сторонние силы действуют только внутри источника электрической энергии.

При движении в такой цепи единичный электрический заряд приобретает энергию, равную эдс ε только внутри источника тока, (над ним сторонние силы совершают работу) и всю ее расходует во внешней и внутренней цепях только на тепловое действие, определяемое напряжениями на сопротивлениях источника тока и проводника. Согласно закону сохранения энергии количество затраченной энергии $(IR + Ir)$ не может превосходить количество приобретенной энергии (ε) . Прямым следствием этого утверждения является равенство

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (2.35)$$

означающее, что вся энергия, приобретенная зарядом за счет сторонних сил, затрачивается на преодоление внешнего и внутреннего сопротивлений цепи. Равенство (2.35) часто используют в виде

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (2.36)$$

Это соотношение, подтвержденное многочисленными экспериментальными данными, известно под названием **закона Ома для всей (полной, замкнутой) цепи**.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Чем отличается замкнутая цепь от участка цепи?
2. Изобразите простую замкнутую цепь и укажите в ней место сосредоточения и действия сторонних сил.
3. Какой процесс является источником энергии в замкнутой цепи?
4. Обоснуйте закон Ома для замкнутой цепи как частную форму закона сохранения энергии.
5. Используя закон Ома (2.36) для замкнутой цепи, получите закон Ома (2.7) для участка цепи.

Примеры решения задач

Задача 2.8

Найти ток I и эдс ε источника энергии с внутренним сопротивлением $r = 10 \text{ Ом}$, замкнутого на проводник с сопротивлением $R = 1000 \text{ Ом}$, если при последовательном включении в эту цепь миллиамперметра с сопротивлением $R_0 = 100 \text{ Ом}$ он показывает ток $I_0 = 25 \text{ мА}$.

Дано: $r = 10 \text{ Ом}$
 $R = 1000 \text{ Ом};$
 $R_0 = 100 \text{ Ом};$
 $I_0 = 25 \text{ мА}.$

Найти: $I, \varepsilon.$

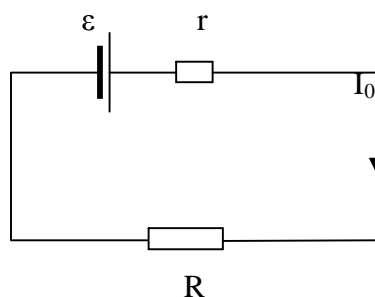


Рис. 1

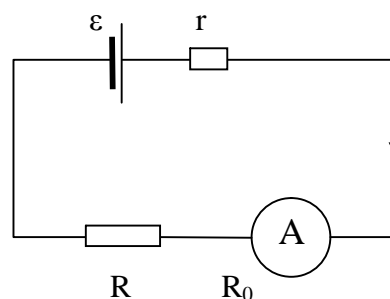


Рис. 2

Построим систему уравнений для решения задачи, воспользовавшись законом Ома для замкнутой цепи.

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad - \text{ закон Ома для замкнутой цепи (рис.1);} \quad (1) \\ I_0 = \frac{\varepsilon}{R + R_0 + r} \quad - \text{ закон Ома для замкнутой цепи (рис.2).} \quad (2) \end{array} \right.$$

В этой системе уравнений две неизвестные величины - I , ε . Если теперь разделить правые и левые части уравнений (1) и (2), то получим уравнение

$$\frac{I}{I_0} = \frac{R + R_0 + r}{R + r} \quad (3)$$

в котором остается только одна неизвестная величина – I . Решая его относительно этой неизвестной величины, найдем силу тока в цепи

$$I = I_0 \frac{R + R_0 + r}{R + r}. \quad (4)$$

Из уравнения (2) получим эдс источника тока

$$\varepsilon = I_0 (R + R_0 + r). \quad (5)$$

Подставляя в (4) и (5) численные значения параметров, имеем:

$$I = 25 \cdot 10^{-3} \frac{10^3 + 10^2 + 10}{10^3 + 10} = 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ (A)};$$

$$\varepsilon = 25 \cdot 10^{-3} (10^3 + 10^2 + 10) = 27,75 \text{ (В)}.$$

Ответ: сила тока в цепи $I = I_0 \frac{R + R_0 + r}{R + r} = 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ A};$

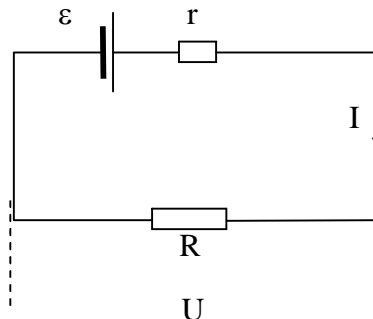
эдс в цепи $\varepsilon = I_0 (R + R_0 + r) = 27,75 \text{ В}.$

Задача 2.9

Элемент с эдс $\varepsilon = 2,5 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,24 \text{ Ом}$, соединен с реостатом. Найти длину L проволоки из которой изготовлен реостат, если площадь ее поперечного сечения $S = 0,75 \text{ мм}^2$, удельное сопротивление $\rho = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и напряжение на зажимах $U = 2,38 \text{ В}$.

Дано: $\varepsilon = 2,5 \text{ В};$
 $r = 0,24 \text{ Ом};$
 $U = 2,38 \text{ В};$
 $S = 0,75 \text{ мм}^2;$
 $\rho = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$

Найти L .



Для решения задачи составим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{ll} I = \frac{\varepsilon}{r + R} & \text{– ток в цепи; закон Ома для полной цепи;} \quad (1) \\ U = I R & \text{– закон Ома для участка цепи;} \quad (2) \\ R = \rho \frac{L}{S} & \text{– сопротивление реостата;} \quad (3) \end{array} \right.$$

Из соотношения (2) найдем ток в цепи

$$I = \frac{U}{R} \quad (4)$$

и его значение подставим в (1)

$$\frac{U}{R} = \frac{\varepsilon}{r + R} . \quad (5)$$

Это соотношение представим в виде

$$U r + U R = \varepsilon R . \quad (6)$$

Отсюда получим сопротивление нагрузки

$$R = r \frac{U}{\varepsilon - U} . \quad (7)$$

Теперь вместо сопротивления R подставим его явное выражение (3), зависящее от длины L проволоки и ее площади S поперечного сечения,

$$\rho \frac{L}{S} = r \frac{U}{\varepsilon - U} .$$

Из этого соотношения получим аналитическое выражение для длины проволоки и ее численное значение, представленные в ответе.

Ответ: длина проволоки реостата - $L = \frac{S}{\rho} r \frac{U}{\varepsilon - U} = 41 \text{ м.}$

Задача 2.10

Найти эдс источника энергии в цепи постоянного тока, если известно, что при увеличении в n раз сопротивления нагрузки, подключенной к элементу, напряжение на ней возрастает от U_1 до U_2 .

Дано: U_1, U_2, n .
Найти: ε .

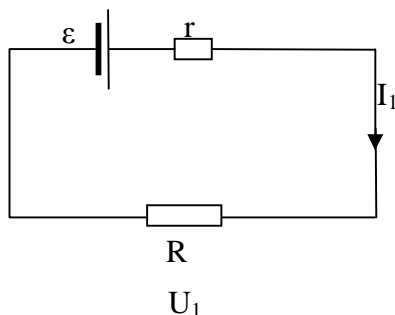


Рис.1

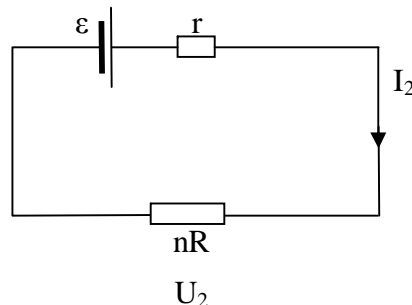


Рис. 2

Система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Первая цепь (рис.1)} & \\ U_1 = I_1 R & \text{– закон Ома для участка цепи; (1)} \\ I_1 = \frac{\varepsilon}{R + r} & \text{– закон Ома для полной цепи; (2)} \\ \text{Вторая цепь (рис.2)} & \\ U_2 = I_2 n R & \text{– закон Ома для участка цепи; (3)} \\ I_2 = \frac{\varepsilon}{n R + r} & \text{– закон Ома для полной цепи; (4)} \end{array} \right.$$

Для решения этой системы, разделим правые и левые части уравнений (1) и (3)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2 n}.$$

Подставим в это соотношение выражения для токов (2) и (4)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n R + r}{n (R + r)}.$$

Отсюда получим

$$\frac{U_1}{U_2} n (R + r) = n R + r.$$

После простых преобразований последнее соотношение приведем к виду

$$n R \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right) = r \left(1 - n \frac{U_1}{U_2} \right)$$

и из него найдем внутреннее сопротивление источника тока и отношение r / R

$$r = n R \frac{U_1 - U_2}{U_2 - n U_1}; \quad \rightarrow \quad \frac{r}{R} = n \frac{U_1 - U_2}{U_2 - n U_1}.$$

Используя уравнения (1), (2) и последнее соотношение, получим

$$\varepsilon = I_1 (R + r) = U_1 \frac{R + r}{R} = U_1 \left(1 + \frac{r}{R} \right) = U_1 \left(1 + n \frac{U_1 - U_2}{U_2 - n U_1} \right).$$

Приведем выражение в скобках к общему знаменателю

$$\varepsilon = U_1 \cdot \frac{U_2 - n U_1 + n U_1 - n U_2}{U_2 - n U_1}.$$

После сокращения одинаковых членов в числителе, имеем окончательный результат для эдс источника энергии в цепи, представленный в ответе.

Ответ: $\varepsilon = U_1 U_2 \cdot \frac{1 - n}{U_2 - n U_1}.$

2.5.5. Закон Ома для неоднородного участка цепи

Выберем некоторый участок цепи, напряжение на концах которого U . Это напряжение численно равно работе, совершаемой электрическим полем при перемещении единичного заряда с одного конца участка цепи на другой. Как известно, вся эта работа идет на преодоление сопротивления проводника и является мерой количества тепла, произведенного на этом участке цепи. Если теперь в этот участок включить эдс ε , то результат *одновременного действия на положительные заряды электрических и сторонних сил* будет определяться соотношением между ними. На рисунках 2.9 – 2.11 представлены неоднородные участки цепи. На них стрелками указаны направления действия электрических ($\vec{F}_э$) и сторонних ($\vec{F}_{ст}$) сил, а также определяемое их совместным действием направление перемещения положительных зарядов.

Пусть сначала электрические и сторонние силы действуют на заряды в одну сторону (рис.2.9).

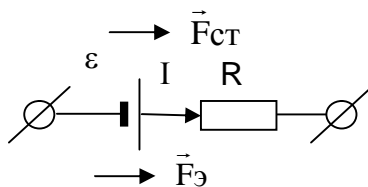


Рис.2.9

В данном случае ток идет в направлении действия этих сил, совершающих над зарядом работу **одного знака**, являющейся мерой превращения кинетической энергии зарядов в другие виды энергии. На рассматриваемом участке цепи она может тратиться только на производство теплоты. Согласно закону сохранения энергии должно выполняться соотношение

$$U + \varepsilon = IR, \quad (2.37)$$

являющееся законом Ома для участка цепи с эдс, на котором электрические и сторонние силы действуют в одном направлении.

В этом случае энергия электрического поля и энергия сторонних сил (запасенная работа) расходуется на преодоление сопротивления проводника; участок цепи является потребителем энергии, полученной от внешних источников. На этом участке вследствие наличия эдс другие виды энергии превращаются в электрическую. Эта энергия совместно с энергией, полученной от остальной части цепи, выделяется на этом же участке в виде тепла (правая часть формулы 2.37).

Если же электрические и сторонние силы действуют на заряды в разные стороны, т.е. совершают над зарядами работу **разного знака**, то направление их перемещения определяется совокупным действием этих сил. Пусть

направление электрических сил и электрического тока на рассматриваемом участке цепи совпадают (рис.2.10).

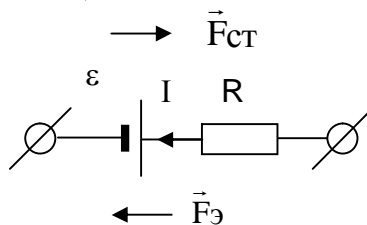


Рис.2.10

В этом случае энергия электрического поля тратится на преодоление сопротивления проводника и сторонних сил. Согласно закону сохранения энергии выполняется равенство

$$U = \varepsilon + IR, \quad (2.38)$$

которое также представляет собой закон Ома для участка цепи с эдс, на котором электрические и сторонние силы действуют в разных направлениях. Из соотношения (2.38) вытекает, что в этом случае $U > \varepsilon$, и электрические силы являются определяющими на рассматриваемом участке цепи.

Левая часть равенства (2.38) – энергия, затрачиваемая электрическим полем при перемещении единичного положительного заряда с одного конца участка на другой. Правая часть указывает на потребителей этой энергии: ε - работа по преодолению действия сторонних сил (превращению в другие виды энергии, например, в химическую при зарядке аккумулятора); IR - потери энергии, связанные с тепловым действием тока. Из сказанного ясно, что рассматриваемый участок цепи является потребителем электрической энергии.

Рассмотрим последнюю из возможностей, когда направления электрического тока и действия сторонних сил совпадают (рис.2.11).

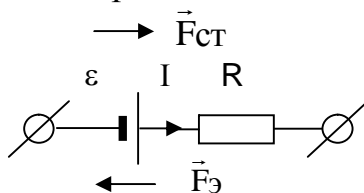


Рис.2.11

В этом случае работа сторонних сил тратится на преодоление сопротивления проводника и сил электрического поля. Закон сохранения энергии имеет вид

$$\varepsilon = U + IR. \quad (2.39)$$

Последнее равенство, так же как и соотношение (2.38), представляет собой закон Ома для участка цепи с эдс. Из соотношения (2.39) вытекает, что в этом случае $\varepsilon > U$, и сторонние силы являются определяющими: ток идет в направлении действия сторонних сил, заряды двигаются против сил электрического поля, и участок для внешней цепи является генератором или источником электрической энергии с «эдс».

В заключение отметим, что если электрические и сторонние силы действуют на заряды в противоположные стороны, то эдс носит название **противо – эдс**.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какой участок цепи называется неоднородным? В чем его сходство и отличие с однородным?
2. Представьте возможные соотношения между направлениями действия электрических и сторонних сил на участке цепи с эдс.
3. В чем отличие между эдс источника тока и противо-эдс? Когда эдс следует рассматривать как противо-эдс? Приведите примеры.
4. В каких случаях участок цепи с эдс является потребителем и источником электрической энергии?
5. Представьте полученные выше формулы для закона Ома в виде единого соотношения, считая параметры U и ε алгебраическими величинами.
6. Дайте интерпретацию различных формулировок закона Ома для участка цепи с эдс на основе закона сохранения энергии.
7. Аккумулятор с эдс $\varepsilon = 11,2$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,3$ Ом заряжается током $I = 4$ А. Найдите показания U вольтметра, присоединенного к полюсам аккумулятора.

Примеры решения задач

Задача 2.11

В конце зарядки аккумулятора током $I_1 = 4$ А напряжение на его полюсах $U_1 = 2,16$ В. В начале разрядки аккумулятора током $I_2 = 5$ А напряжение на них $U_2 = 1,8$ В. Найти эдс ε и внутреннее сопротивление r аккумулятора.

Дано: $I_1 = 4$ А;
 $U_1 = 2,16$ В;
 $I_2 = 5$ А;
 $U_2 = 1,8$ В.

Найти: ε , r .

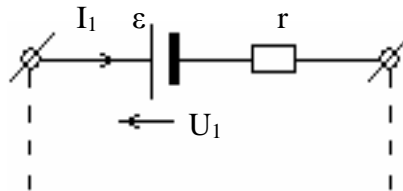
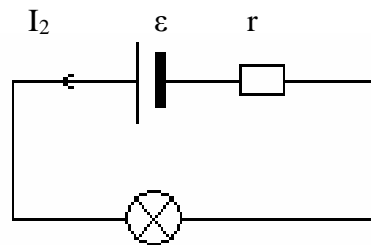


Рис.1



внешняя цепь

Рис.

Система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\begin{cases} U_1 = \varepsilon + I_1 r & \text{– зарядка; закон Ома для участка цепи с эдс (рис.1);} \\ \varepsilon = U_2 + I_2 r & \text{– закон Ома для всей цепи (рис. 2);} \end{cases} \quad \begin{matrix} (1) \\ (2) \end{matrix}$$

Подставим эдс ε из соотношения (2) в (1)

$$U_1 = U_2 + (I_1 + I_2) r.$$

Отсюда

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}. \quad (3)$$

Теперь, используя (3) в уравнении (2), имеем

$$\varepsilon = U_2 + I_2 \frac{U_1 - U_2}{I_1 + I_2}.$$

Ответ: эдс и внутреннее сопротивление аккумулятора –

$$\varepsilon = U_2 + I_2 \frac{U_1 - U_2}{I_1 + I_2}, \quad r = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}$$

Задача 2.12

Аккумуляторная батарея с эдс $\varepsilon = 10,2$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,9$ Ом подключена для зарядки к источнику напряжения $U = 14$ В. Какое дополнительное сопротивление R необходимо включить последовательно с батареей, чтобы сила зарядного тока не превышала $I = 2$ А?

Дано: $\varepsilon = 10,2$ В;

$r = 0,9$ Ом;

$U = 14$ В;

$I = 2$ А.

Найти: R .

Для решения задачи воспользуемся соотношением (2.35) в виде

$$U = \varepsilon + I(r + R), \quad (1)$$

т.к. $U - \varepsilon > 0$. Из этого уравнения легко получить величину добавочного сопротивления

$$R = \frac{U - \varepsilon - Ir}{I}. \quad (2)$$

Подставляя в формулу (2) значения параметров, определенных условиями задачи, получим численное значение добавочного сопротивления.

Ответ: $R = \frac{U - \varepsilon - Ir}{I} = 1$ Ом.

2.5.6. Закон Ома для цепи, содержащей несколько одинаковых эдс

На практике нередко один источник электрической энергии в цепи недостаточен, т.к. не создает необходимого напряжения на внешней цепи или требуемой силы тока в ней. В таких случаях несколько источников соединяют в батарею источников электрической энергии. Их соединение может быть *последовательным, параллельным* или *смешанным*. Рассмотрим более подробно каждое из них.

Последовательное соединение источников тока

Последовательным согласованным называется соединение источников электрической энергии, при котором положительный полюс предыдущего источника соединяют с отрицательным полюсом последующего. На практике обычно в батарею соединяют одинаковые источники электрической энергии (рис 2.9,а)

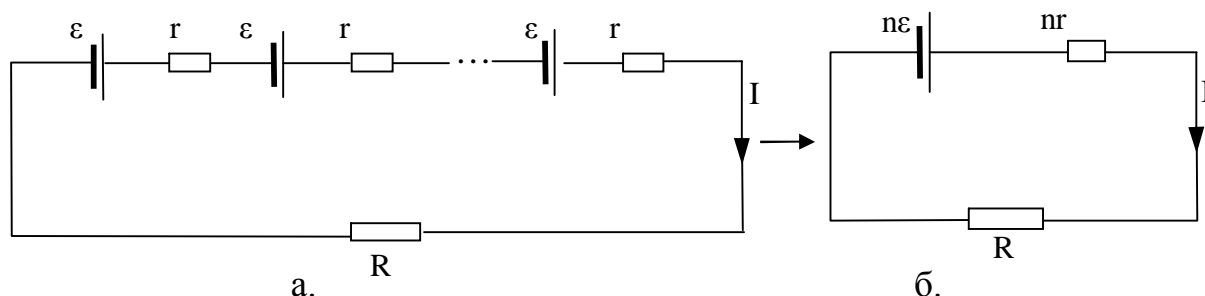


Рис. 2.12

Из этой схемы видно, что при последовательном соединении, чтобы попасть с одного конца проводника на другой, заряд должен поочередно пройти через все источники электрической энергии, и в каждом из них он приобретает энергию, равную эдс ε . Иначе говоря, сторонние силы при прохождении заряда через n источников совершают над ним в n раз большую работу, чем при прохождении через один из них, т.е. *эдс батареи при последовательном соединении в n раз превышает эдс одного источника*

$$\varepsilon_{\text{б}} = \varepsilon_{\text{батареи}} = n \varepsilon. \quad (2.40)$$

С другой стороны, поскольку заряд последовательно проходит через все источники электрической энергии, то он преодолевает сопротивление, в n раз превышающее сопротивление одного источника, т.е.

$$r_{\text{б}} = r_{\text{батареи}} = n r. \quad (2.41)$$

Таким образом, при последовательном соединении источников электрической энергии увеличивается как эдс, так и внутреннее сопротивление. На рис. 2.12б представлена эквивалентная схема электрической цепи, изображенной на рис. 2.12а.

Закон Ома для всей цепи запишем в виде

$$I = \frac{\varepsilon_{\text{б}}}{R + r_{\text{б}}} \quad (2.42)$$

или с учетом формул (2.40) и (2.41)

$$I = \frac{n \varepsilon}{R + n r}. \quad (2.43)$$

Последнее соотношение представляет собой закон Ома для n последовательно соединенных одинаковых источников тока.

Зная значение силы тока во внешней цепи, найдем напряжение на сопротивлении нагрузки

$$U = I R = \frac{n \varepsilon}{R + n r} R. \quad (2.44)$$

Если ток в цепи с одной эдс (рис. 2.12, $n = 1$) и напряжение на нагрузке представить в виде

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R + r}; \quad U_0 = I_0 R = \frac{\varepsilon}{R + r} R; \quad (2.45)$$

то легко видеть, что

$$\frac{I}{I_0} = \frac{U}{U_0} = \frac{n(R + r)}{R + nr} = \frac{R + r}{\frac{R}{n} + r} > 1; \quad (2.46)$$

или

$$I = n I_0 \frac{R + r}{R + nr}; \quad U = n U_0 \frac{R + r}{R + nr}. \quad (2.47)$$

Из соотношения (2.46) следует, что ток в цепи и напряжение на нагрузке при последовательном согласованном соединении источников тока *одинаково возрастают* по сравнению со случаем одного источника с неизменной внешней цепью. Такое соединение применяется в случае, когда необходимо повысить напряжение или ток во внешней цепи.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какое соединение источников тока называется последовательным и согласованным?
2. В чем различие согласованного и встречного (несогласованного) включения последовательно соединенных источников тока?
3. Почему происходит увеличение эквивалентных эдс и внутреннего сопротивления при последовательном соединении источников тока?
4. Дайте формулировку закона Ома для замкнутой цепи с несколькими последовательно соединенными источниками тока.
5. Докажите, что ток в цепи и напряжение на нагрузке при последовательном согласованном соединении источников тока одинаково возрастают по сравнению со случаем одного источника, если внешняя цепь неизменна.
6. Как определить направление тока в замкнутой цепи с несколькими последовательно соединенными эдс в режиме согласованного и несогласованного их включения?

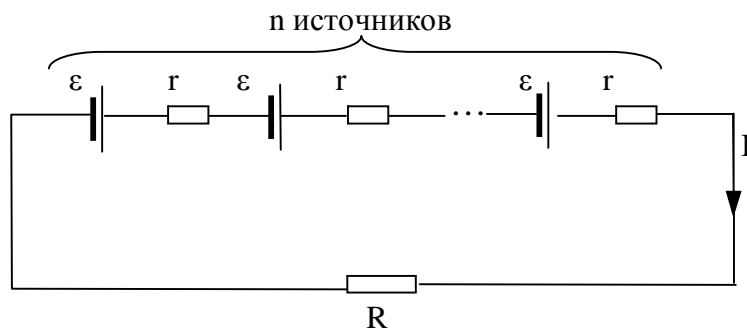
Примеры решения задач

Задача 2.13

Найти количество n последовательно соединенных одинаковых аккумуляторов с эдс $\varepsilon = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом каждый в цепи постоянного тока, если напряжение на зажимах батареи $U = 60$ В и сила тока в цепи $I = 2$ А.

Дано: $r = 1$ Ом;
 $U = 60$ В;
 $I = 2$ А;
 $\varepsilon = 12$ В.

Найти: n .



Система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} I = \frac{\varepsilon_{\text{б}}}{r_{\text{б}} + R} & \text{– закон Ома для полной цепи (эквивалентная цепь);} \quad (1) \\ \varepsilon_{\text{б}} = n \varepsilon & \text{– эдс эквивалентная } n \text{ последовательно соединенным эдс } \varepsilon; \quad (2) \\ r_{\text{б}} = n r & \text{– сопротивление, эквивалентное } n \text{ последовательно} \quad (3) \\ & \text{соединенным сопротивлениям } r; \\ U = I R & \text{– закон Ома для участка цепи (см. рис.).} \quad (4) \end{array} \right.$$

Подставляя соотношения (2), (3), (4) в формулу (1), получим уравнение с неизвестным n

$$I = \frac{n \varepsilon}{n r + \frac{U}{I}}.$$

Это соотношение преобразуем к виду

$$I \left(n r + \frac{U}{I} \right) = n \varepsilon$$

или

$$I n r + U = n \varepsilon.$$

Отсюда найдем число последовательно включенных эдс в цепи

$$n = \frac{U}{\varepsilon - I r}.$$

После простых вычислений имеем

$$n = 6.$$

Ответ: количество последовательно соединенных одинаковых аккумуляторов: $n = 6$.

Параллельное соединение источников тока

Параллельным согласованным называется соединение источников электрической энергии, при котором все их положительные полюсы присоединены к одному концу проводника, а отрицательные – к другому. На практике, так же, как и в предыдущем случае, обычно в батарею соединяют одинаковые источники электрической энергии (рис 2.13а).

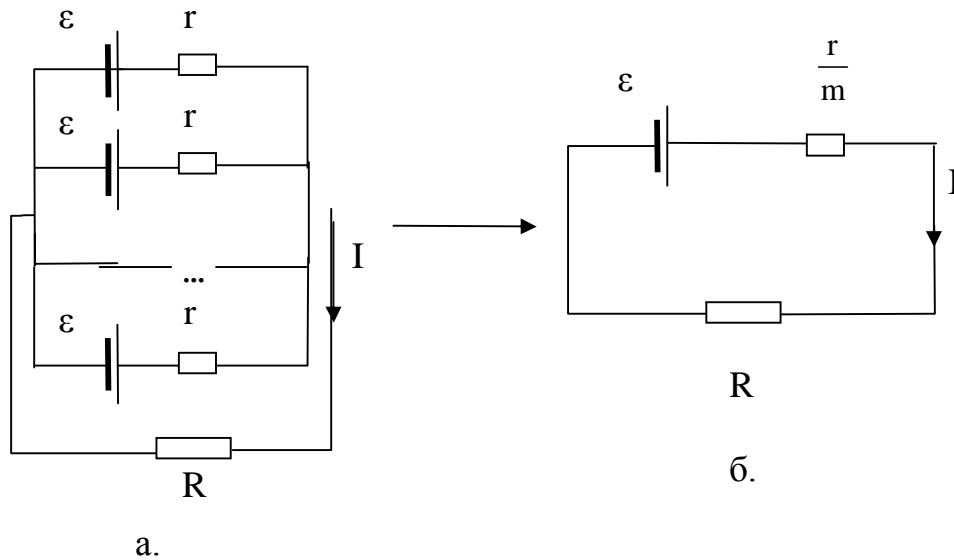


Рис. 2.13

Из схемы видно, чтобы попасть с одного конца проводника на другой и далее во внешнюю цепь, единичный заряд проходит только один источник электрической энергии, приобретая в нем энергию ε . Следовательно, при параллельном соединении эдс всей батареи совпадает с эдс одного источника, т.е.

$$\varepsilon_{\text{б}} = \varepsilon_{\text{батареи}} = \varepsilon. \quad (2.48)$$

Полученная зарядами энергия тратится во внешней цепи на сопротивлении R и сопротивлениях внутренней цепи. Если эта цепь состоит из m параллельно соединенных источников, каждый из которых обладает внутренним сопротивлением r , то эквивалентное сопротивление батареи определяется соотношением

$$r_{\text{б}} = r_{\text{батареи}} = \frac{r}{m}. \quad (2.49)$$

На рис. 2.13,б представлена схема эквивалентная электрической цепи, изображенной на рис. 2.13,а.

Закон сохранения энергии в этом случае имеет вид

$$\varepsilon = IR + Ir_{\text{б}},$$

или

$$I = \frac{\varepsilon_{\text{б}}}{R + r_{\text{б}}} = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{m}} = \frac{m\varepsilon}{mR + r}. \quad (2.50)$$

Зная ток во внешней цепи, можно найти напряжение на сопротивлении нагрузки

$$U = I R = \frac{m \varepsilon}{m R + r} R. \quad (2.51)$$

Если ток в цепи с одной эдс и напряжение на нагрузке представить в виде

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R + r}; \quad U_0 = I_0 R = \frac{\varepsilon}{R + r} R; \quad (2.52)$$

то, принимая во внимание формулы (2.50) - (2.52), легко получить отношения

$$\frac{I}{I_0} = \frac{U}{U_0} = \frac{m(R + r)}{mR + r} = \frac{R + r}{R + \frac{r}{m}} > 1. \quad (2.53)$$

Отсюда найдем ток в цепи и напряжение на нагрузке (рис. 2.13)

$$I = m I_0 \frac{R + r}{mR + r}; \quad U = m U_0 \frac{R + r}{mR + r}. \quad (2.54)$$

Из соотношений (2.54) следует, что ток в цепи и напряжение на нагрузке при параллельном согласованном соединении источников тока, так же, как и при последовательном, *одинаково возрастают* по сравнению со случаем одного источника с неизменной внешней цепью.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какое соединение источников тока называется параллельным и согласованным?
2. В чем различие согласованного и встречного (несогласованного) включения параллельно соединенных источников тока?
3. Как обосновать неизменность эдс всей цепи и уменьшение внутреннего сопротивления при параллельном согласованном соединении одинаковых источников тока?
4. Дайте формулировку закона Ома для замкнутой цепи с несколькими параллельно соединенными одинаковыми источниками тока.
5. Докажите, что ток в цепи и напряжение на нагрузке при параллельном согласованном соединении источников тока одинаково возрастают по сравнению со случаем одного источника, если внешняя цепь неизменна.
6. Как определить направление тока в замкнутой цепи с несколькими параллельно соединенными эдс при согласованном и несогласованном их включении?

Примеры решения задач

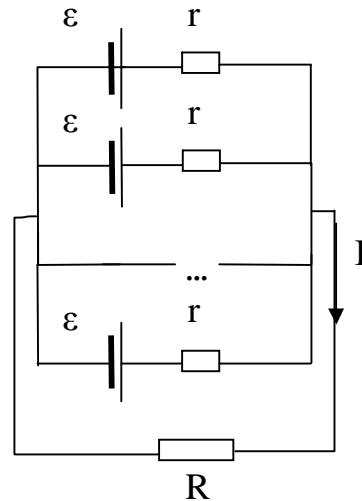
Задача 2.14

Найти количество m параллельно соединенных одинаковых аккумуляторов с эдс $\varepsilon = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом каждый в цепи постоянного тока, если напряжение

на зажимах батареи $U = 6$ В и сила тока в цепи $I = 24$ А. (сравните решение этой задачи с решением задачи 2.13)

Дано: $r = 1$ Ом;
 $U = 6$ В;
 $I = 24$ А;
 $\varepsilon = 12$ В.

Найти: m .



Система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} I = \frac{\varepsilon_0}{r_0 + R} & \text{- закон Ома для полной цепи (эквивалентная цепь);} \quad (1) \\ \varepsilon_0 = \varepsilon & \text{- эдс эквивалентная } m \text{ параллельно соединенным эдс } \varepsilon; \quad (2) \\ r_0 = \frac{r}{m} & \text{- сопротивление эквивалентное } m \text{ параллельно} \quad (3) \\ & \text{соединенным сопротивлениям } r; \\ U = I R & \text{- закон Ома для участка цепи (см. рис.).} \quad (4) \end{array} \right.$$

Подставляя соотношения (2), (3), (4) в формулу (1), получим

$$I = \frac{\varepsilon}{\frac{r}{m} + \frac{U}{I}}.$$

Это соотношение преобразуем к виду

$$I \left(\frac{r}{m} + \frac{U}{I} \right) = \varepsilon$$

или

$$I \frac{r}{m} + U = \varepsilon.$$

Отсюда найдем число последовательно включенных эдс в цепи

$$m = \frac{I r}{\varepsilon - U}.$$

После простых вычислений имеем

$$m = 4.$$

Ответ: количество параллельно соединенных одинаковых аккумуляторов - $m = 4$.

Смешанное соединение источников тока

Смешанным называется такое соединение источников электрической энергии, при котором группы источников, соединенных последовательно, включаются параллельно друг другу (рис.2.14), или же группы источников, соединенных параллельно, включаются последовательно друг другу (рис.2.15). На рис. 2.14 представлена электрическая схема смешанного соединения источников тока и эквивалентная ей схема.

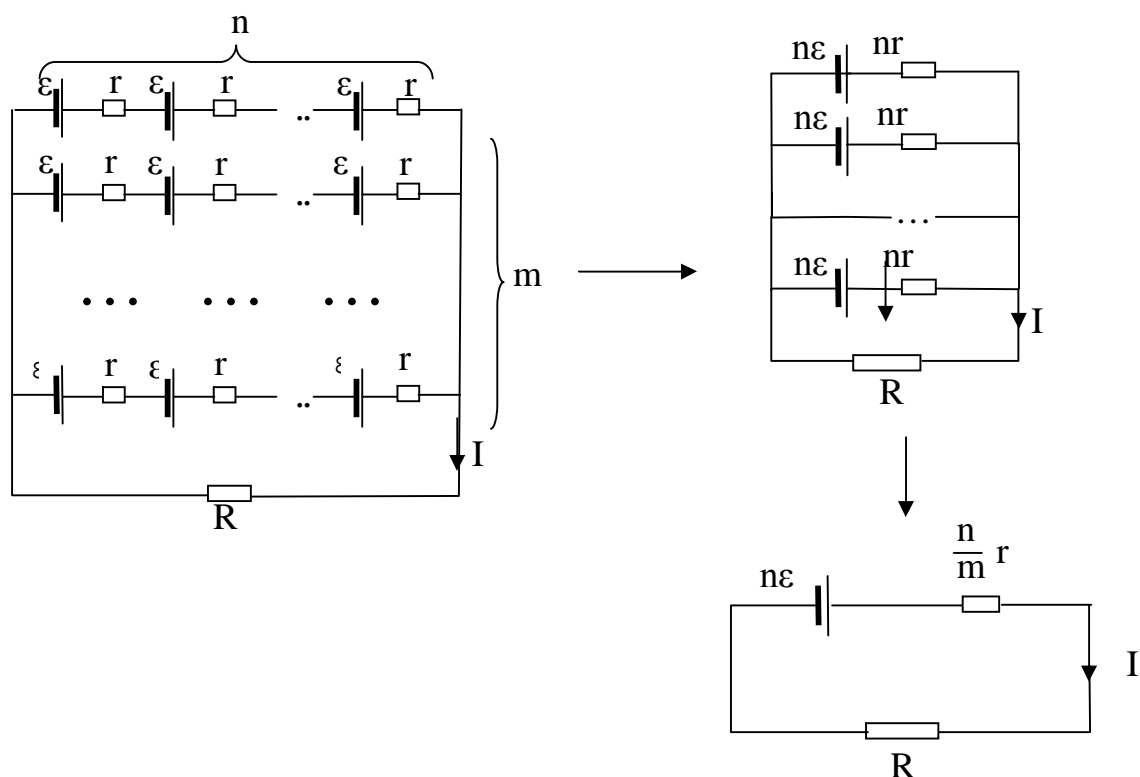


Рис. 2.14

На этой схеме параллельно соединены m батарей, каждая из которых состоит из n последовательно включенных источников тока. Согласно сказанному выше эдс *всей* батареи определяется только количеством последовательно включенных источников

$$\varepsilon_{\text{б}} = \varepsilon_{\text{батареи}} = n \varepsilon. \quad (2.55)$$

Сопротивление внутренней цепи состоит из m ветвей в каждой из которых n последовательно соединенных сопротивлений источников. Поэтому полное сопротивление всей батареи определяется соотношением

$$r_{\text{б}} = r_{\text{батареи}} = \frac{n}{m} r. \quad (2.56)$$

Если теперь в формулу (2.42) подставить явные выражения для эдс (2.55) и сопротивления (2.56), то получим

$$I = \frac{n m \varepsilon}{n r + m R} \quad (2.57)$$

закон Ома для смешанного соединения источников тока.

На рис.2.15 изображена другая электрическая схема смешанного соединения источников тока и соответствующая ей эквивалентная схема.

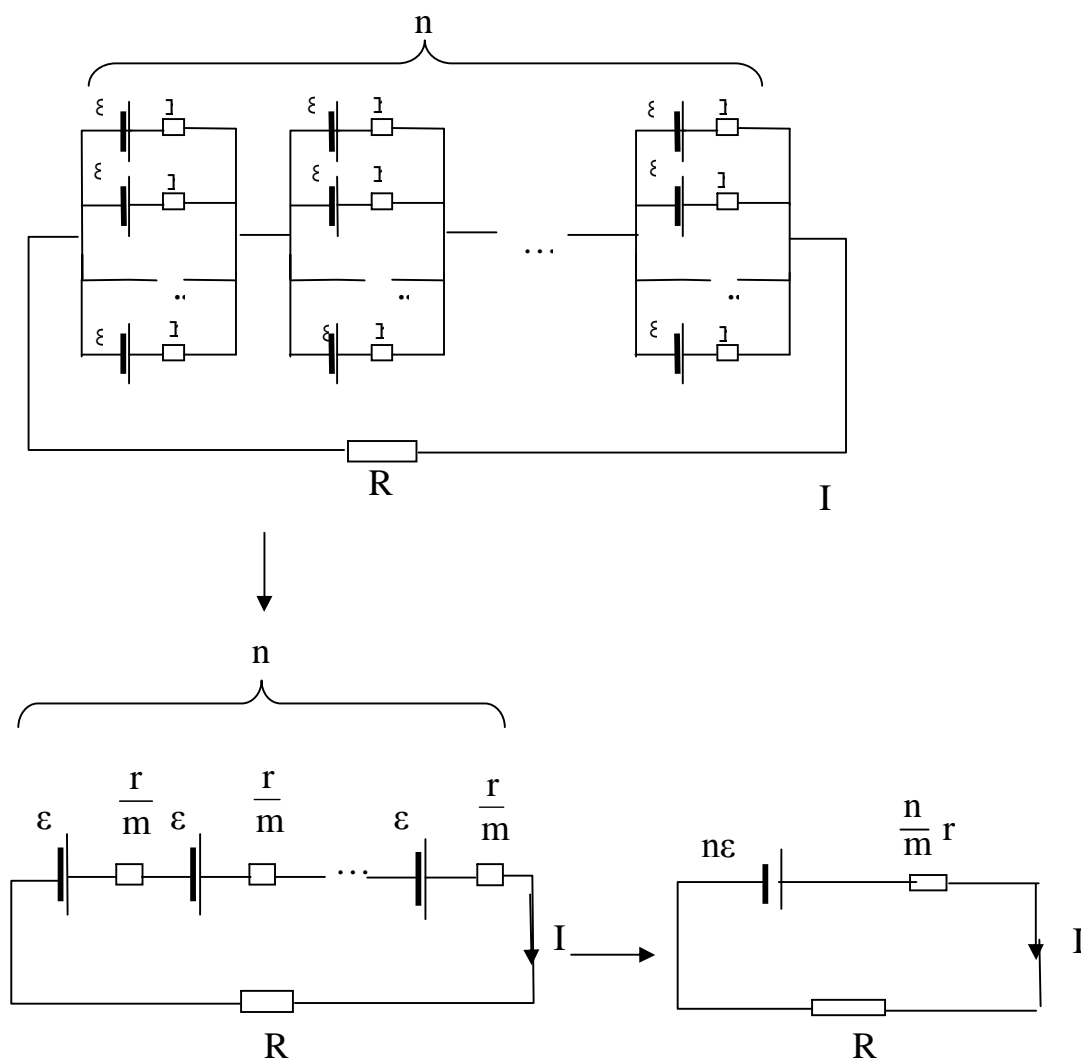


Рис. 2.15

Рассмотрение схемы 2.15, аналогичное приведенному выше, также приводит к формуле (2.57).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какое соединение источников тока называется смешанным?
2. Как найти эквивалентную эдс и эквивалентное внутреннее сопротивление при смешанном согласованном соединении одинаковых источников тока?
3. Дайте формулировку закона Ома для замкнутой цепи со смешанным соединением одинаковых источников тока.
4. Как изменяется ток в цепи и напряжение на нагрузке при смешанном согласованном соединении источников тока по сравнению со случаем одного источника, если внешняя цепь неизменна?

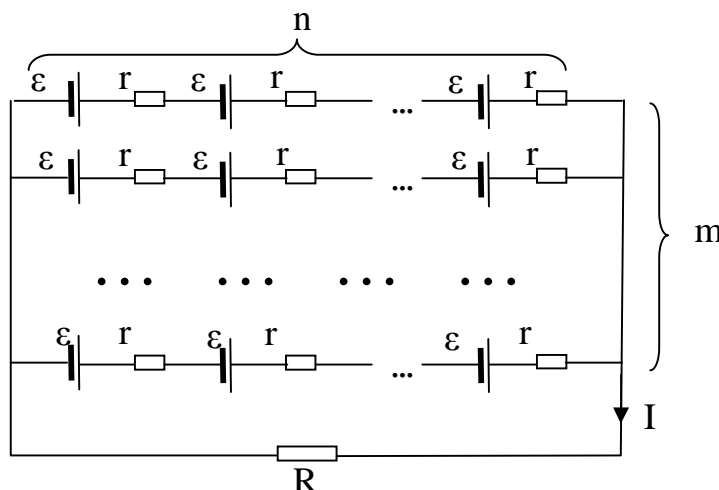
Примеры решения задач

Задача 2.14

Найти силу тока I , протекающего через сопротивление нагрузки $R = 10 \text{ Ом}$ в цепи, состоящей из $m = 20$ параллельно соединенных групп аккумуляторов, в каждой из которых $n = 5$ последовательно соединенных элементов с $\varepsilon = 1,4 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,1 \text{ Ом}$ каждый.

Дано: $R = 10 \text{ Ом};$
 $m = 20;$
 $n = 5;$
 $r = 0,1 \text{ Ом};$
 $\varepsilon = 1,4 \text{ В}.$

Найти: $I.$



Система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} I = \frac{\varepsilon_0}{r_0 + R} & \text{- закон Ома для полной (эквивалентной) цепи;} \quad (1) \\ \frac{1}{r_0} = \frac{m}{n r} & \text{- соотношение для определения эквивалентного} \quad (2) \\ & \text{сопротивления всей батареи;} \\ \varepsilon_0 = n \varepsilon & \text{- эквивалентная эдс всей батареи.} \quad (3) \end{array} \right.$$

Подставляя соотношения (2) и (3) в (1), получим

$$I = \frac{n \varepsilon}{\frac{n}{m} r + R}. \quad (4)$$

После простых алгебраических преобразований окончательный результат принимает вид

$$I = \frac{n m \varepsilon}{n r + m R}. \quad (5)$$

Это соотношение совпадает с формулой (2.57). После простых вычислений имеем

$$I = \frac{100 \cdot 1,4}{5 \cdot 0,1 + 20 \cdot 10} = 0,7 \text{ (A)};$$

Ответ: протекающий через сопротивление нагрузки ток - $I = \frac{n m \varepsilon}{n r + m R} = 0,7 \text{ (A)}$.

2.6. Работа электрического тока, его тепловое действие и мощность

Современную цивилизацию невозможно представить без постоянно возрастающего производства и потребления электрической энергии. Чрезвычайно широкое и разнообразное использование электрического тока связано с тем, что электрическая энергия относительно легко превращается в другие виды энергии:

теплоту – в электрических плитах, лампах накаливания электрическая энергия затрачивается на нагревание;

механическое движение – электродвигатель заставляет перемещаться электропоезда, трамваи и троллейбусы, функциональные узлы миксеров, пылесосов, станков и т.д;

химическую энергию – при электролизе за счет превращения электрической энергии в химическую происходят химические процессы;

электромагнитное излучение – в СВЧ-печах, радиостанциях, электроннолучевых трубках, лампах дневного света и т.д электрическая энергия превращается в излучение.

Мерой превращения энергии электрического тока в другие виды энергии является работа тока. Это утверждение является распространением строго формулируемого в механике закона сохранения энергии на электрические явления.

Из эксперимента известно, что если у потребителей нет эдс, то вся электрическая энергия в цепи, превращается во внутреннюю, т.е. затрачивается на производство теплоты. Превращение же электрической энергии в другие виды происходит только при наличии у потребителей противо-эдс (см.п.2.5.5) и определяется работой тока, затраченной на преодоление противодействия этих эдс. Из закона сохранения энергии следует, что *вся электрическая энергия, превращенная в замкнутой цепи в другие ее виды (тепловую, механическую или химическую), равна сумме работ электрического тока по преодолению сопротивлений и противо-эдс в этой цепи.*

Произведенная электрическим током работа на участке цепи определяется соотношением

$$A = q U, \quad (2.58)$$

где q - количество электричества, прошедшее через поперечное сечение проводника; U - напряжение на проводнике. Учитывая, что $q = I t$, представим (2.58) в виде

$$A = U I t. \quad (2.59)$$

Соотношения (2.58) и (2.59) представляют собой полную работу, совершаемую электрическим током на участке цепи. Иначе говоря, это энергия, которая

передается всем потребителям на участке и *распределяется только между ними* независимо от того, в какой вид энергии эти потребители преобразуют электрическую энергию.

Если участок цепи представляет собой проводник сопротивлением R , то при прохождении по нему тока проводник нагревается. В этом случае вся работа электрического тока расходуется на производство теплоты, и согласно (2.59) можно записать

$$Q = A = U I t. \quad (2.60)$$

Учитывая, что $U = I R$ и $I = \frac{U}{R}$ соотношение (2.60) представим в виде

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}. \quad (2.61)$$

Зависимость произведенной током теплоты от силы тока и сопротивления участка цепи установлена в 1841 г. Дж. П. Джоулем и подтверждена точными опытами в 1842 г. Э. Х. Ленцем и называется *законом Джоуля – Ленца*.

Причина производства теплоты при прохождении тока по проводнику состоит в том, что под действием электрического поля, созданного в проводнике источником тока, электроны ускоряются и, сталкиваясь с ионами кристаллической решетки, передают им часть кинетической энергии своего направленного движения. Это приводит к увеличению амплитуды их колебаний, что воспринимается физическими приборами и органами чувств человека как увеличение температуры проводника.

Полная работа, совершаемая источником электрической энергии над зарядом q , согласно физическому смыслу эдс источника, определяется следующим соотношением

$$A = q \varepsilon = \varepsilon I t. \quad (2.62)$$

Это электрическая энергия, передаваемая источником в цепь и распределяемая между всеми потребителями этой цепи независимо от природы преобразования ее потребителями в другие виды энергии.

Из механики известно, что отношение работы к интервалу времени, в течение которого она произведена, представляет собой среднюю мощность

$$P_{\text{ср}} = \frac{A}{t}, \quad (2.63)$$

зависящую от величины временного интервала. Мгновенная мощность

$$P = \frac{d A}{d t} \quad (2.64)$$

определяется как средняя мощность за бесконечно малый промежуток времени dt . Если же работа производится равномерно, т.е. ее значение пропорционально времени, как в формулах (2.59) и (2.62), то мощность

$$P = \frac{A}{t} \quad (2.65)$$

является постоянной, не зависящей от времени величиной. Заменяя в соотношении (2.65) работу ее значением (2.59) и сокращая t в числителе и знаменателе, получим выражение для полной мощности тока на участке цепи

$$P = UI. \quad (2.66)$$

Это соотношение является количественным выражением электрической энергии, передаваемой потребителям на участке цепи в единицу времени.

Мощность тока, затрачиваемая только на его тепловое действие, может быть получена из соотношения (2.61)

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (2.67)$$

Эта формула определяет количество тепла, производимое в проводнике с сопротивлением R в единицу времени.

Мощность, развиваемая источником постоянного тока, согласно соотношениям (2.62) и (2.65), определяется формулой

$$P = \varepsilon I \quad (2.68)$$

и представляет собой количество энергии, передаваемое потребителям во всей замкнутой цепи в единицу времени.

Из закона сохранения энергии следует, что *мощность источника равна сумме мощностей токов на отдельных участках, образующих замкнутую цепь*

$$\varepsilon I = I^2 R + I^2 (r_1 + r_2). \quad (2.69)$$

Каждое слагаемое в последней формуле имеет определенный физический смысл.

εI - мощность сторонних сил, разделяющих разноименные заряды в источнике тока и совершающих работу против электростатических сил;

$I^2 R$ - полезная мощность; мощность, передаваемая потребителю с сопротивлением R ;

$I^2 (r_1 + r_2)$ - потери мощности на нагревание; мощность, теряемая на внутреннем сопротивлении источника ($I^2 r_1$) и в подводящих проводах ($I^2 r_2$).

Мощность измеряется в *ваттах* (Вт)

$$\text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Ватт – мощность источника, производящего один джоуль энергии в секунду.

Вопросы и задания для самопроверки

1. В какие виды энергии может преобразовываться электрическая энергия? Приведите примеры.

2. Обоснуйте утверждение, что мерой превращения энергии электрического тока в другие виды энергии является работа тока.
3. Какой процесс в замкнутой электрической цепи является источником энергии электрического тока?
4. В каких цепях вся электрическая энергия превращается во внутреннюю, т.е. затрачивается на производство теплоты?
5. Каким свойством должен обладать потребитель электрической энергии, чтобы работа тока в нем превращалась не только в тепловую, но и другие виды энергии?
6. Приведите формулу для работы тока на участке электрической цепи. В каких единицах измеряется работа тока?
7. Сформулируйте закон Джоуля – Ленца и обоснуйте его, используя закон сохранения энергии.
8. Что является причиной производства теплоты при прохождении тока по проводнику?
9. Приведите формулу для электрической энергии, передаваемой источником в цепь.
10. Дайте общие определения средней, мгновенной и постоянной мощностей. В чем сходство и отличие этих понятий? Вспомните определения средней и мгновенной скоростей (ускорений) в механике. Попробуйте найти общее в формулировке понятий среднего и мгновенного значений физической величины. Приведите известные вам примеры средних и мгновенных величин из других областей науки, техники, производства.
11. Определите понятия мощности тока на участке цепи и мощности источника электрической энергии. Дайте физическое толкование этим понятиям. Приведите соответствующие формулы.
12. В каких единицах измеряется мощность тока и мощность источника электрической энергии? В одинаковых или разных единицах измеряется мощность силы в механике и мощность тока в электродинамике? Ответ обоснуйте и приведите примеры.
13. На что расходуется мощность тока на участке цепи и мощность источника тока?
14. Дайте определения полезной мощности и мощности потерь.

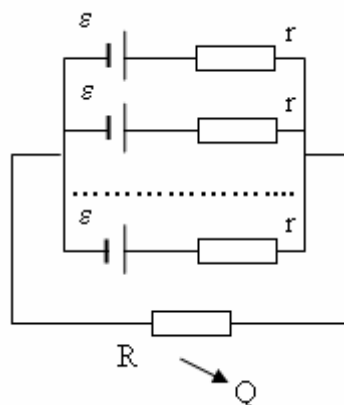
Примеры решения задач

Задача 2.15

Во внешней цепи при токе I за время t производится количество тепловой энергии Q . Найти число m элементов, питающих внешнюю цепь, если они соединены параллельно и каждый из них имеет эдс ε и внутреннее сопротивление r .

Дано: I, t, r, ε, Q .

Найти: m .



Напоминание. Если батарея состоит из n параллельно соединенных источников тока с эдс ε и внутренним сопротивлением r каждый, то эквивалентная эдс батареи и ее внутреннее сопротивление определяются формулами

$$\varepsilon_{\bar{0}} = \varepsilon; \quad r_{\bar{0}} = \frac{r}{m}.$$

С учетом этого замечания система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \frac{\varepsilon}{\frac{r}{m} + R} \quad \text{– закон Ома для полной цепи (см. рис.);} \\ Q = I^2 R t \quad \text{– количество теплоты, выделяемое в нагрузке.} \end{array} \right. \quad (1)$$

Из соотношения (2) найдем сопротивление нагрузки

$$R = \frac{Q}{I^2 t} \quad (3)$$

и подставим его в (1). В результате имеем

$$I = \frac{\varepsilon}{\frac{r}{m} + \frac{Q}{I^2 t}}.$$

Отсюда

$$\varepsilon = I \frac{r}{m} + \frac{Q}{I t}. \quad (4)$$

В этом уравнении единственной неизвестной величиной является m . Решая уравнение (4) относительно этой величины, получим результат представленный в ответе.

Ответ: $m = \frac{I^2 r t}{\varepsilon I t - Q}.$

Задача 2.16

Аккумуляторная батарея с эдс $\varepsilon = 9,5$ В, внутренним сопротивлением $r = 0,5$ Ом и включенным последовательно с ней дополнительным сопротивлением $R = 1$ Ом подключена для зарядки к источнику напряжения $U = 15$ В. Определить силу I зарядного тока, количество W запасенной аккумулятором химической энергии и количество тепла, выделенного в батарее (Q_1) и на добавочном сопротивлении (Q_2) за $t = 20$ мин.

Дано: $\varepsilon = 9,5$ В;
 $r = 0,5$ Ом;
 $R = 1$ Ом;
 $U = 15$ В;
 $t = 20$ мин = 1200 с.

Найти: I , W , Q_1 , Q_2 .

Аккумуляторная батарея находится в режиме зарядки. Для участка цепи с противо-эдс и добавочным сопротивлением выполняется соотношение (2.35) в виде

$$U = \varepsilon + I(r + R), \quad (1)$$

Из этого уравнения легко найти силу тока

$$I = \frac{U - \varepsilon}{r + R}. \quad (2)$$

Для нахождения остальных неизвестных параметров задачи умножим обе части соотношения (1) на множитель $I t$. В результате получим равенство

$$U I t = \varepsilon I t + I^2 r t + I^2 R t, \quad (3)$$

являющееся законом сохранения энергии. Каждое слагаемое в этой формуле имеет определенный физический смысл. Левая его часть представляет собой работу сил электрического поля на участке цепи с эдс, которая тратится на зарядку аккумулятора ($\varepsilon I t$), т.е. превращение электрической энергии в химическую и производство теплоты на внутреннем ($I^2 r t$) и внешнем ($I^2 R t$) сопротивлениях. Используя введенные в задаче обозначения и формулу (3), можно записать

$$W = \frac{\varepsilon (U - \varepsilon)}{r + R} t, \quad Q_1 = \left(\frac{U - \varepsilon}{r + R} \right)^2 r t, \quad Q_2 = \left(\frac{U - \varepsilon}{r + R} \right)^2 R t. \quad 4.$$

Подставляя в формулы (2) и (4) значения параметров, определенных условиями задачи, получим численные значения неизвестных величин, представленных ниже.

Ответ: $I = \frac{U - \varepsilon}{r + R} = 3,7 \text{ A};$

$$W = \varepsilon I t = 42180 \text{ Дж}, \quad Q_1 = I^2 r t = 8214 \text{ Дж}, \quad Q_2 = I^2 R t = 16428 \text{ Дж}.$$

Задача 2.17

Две лампочки с номинальными мощностями $P_{H1} = 40 \text{ Вт}$ и $P_{H2} = 100 \text{ Вт}$ и номинальным напряжением $U_H = 110 \text{ В}$ соединяют последовательно и включают в сеть с постоянным напряжением $U = 220 \text{ В}$. Найти мощности P_1 и P_2 каждой лампочки.

Дано: $P_{H1} = 40 \text{ Вт}; \quad P_{H2} = 100 \text{ Вт};$

$U_H = 110 \text{ В}; \quad U = 220 \text{ В}.$

Найти: $P_1, P_2.$

Система уравнений для решения задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_1 = I^2 R_1 & \text{— мощность, выделяющаяся на первой лампочке;} \quad (1) \\ P_2 = I^2 R_2 & \text{— мощность, выделяющаяся на второй лампочке;} \quad (2) \\ P_{H1} = \frac{U_H^2}{R_1} & \text{— номинальная мощность, выделяющаяся на первой лампочке;} \quad (3) \\ P_{H2} = \frac{U_H^2}{R_2} & \text{— номинальная мощность, выделяющаяся на второй лампочке;} \quad (4) \\ I = \frac{U}{R_1 + R_2} & \text{— ток на участке цепи (закон Ома для участка цепи).} \quad (5) \end{array} \right.$$

Из уравнений (3) и (4) найдем сопротивления ламп

$$R_1 = \frac{U_H^2}{P_{H1}}; \quad R_2 = \frac{U_H^2}{P_{H2}} \quad (6)$$

и подставим полученные выражения совместно с (5) в соотношение (1). В результате имеем

$$P_1 = \frac{U^2}{\left(\frac{U_H^2}{P_{H1}} + \frac{U_H^2}{P_{H2}} \right)^2} \cdot \frac{U_H^2}{P_{H1}}. \quad (7)$$

После простых преобразований (7) принимает вид

$$P_1 = P_{H1} \cdot \left(\frac{U}{U_H} \cdot \frac{P_{H2}}{P_{H1} + P_{H2}} \right)^2. \quad (8)$$

Аналогично найдем мощность второй лампы

$$P_2 = P_{H2} \cdot \left(\frac{U}{U_H} \cdot \frac{P_{H1}}{P_{H1} + P_{H2}} \right)^2. \quad (9)$$

Подставляя в формулы (8) и (9) численные значения параметров, определенные условиями задачи, получим численные значения мощностей представленные в ответе.

$$\text{Ответ: } P_1 = P_{H1} \cdot \left(\frac{U}{U_H} \cdot \frac{P_{H2}}{P_{H1} + P_{H2}} \right)^2 = 81,6 \text{ Вт};$$

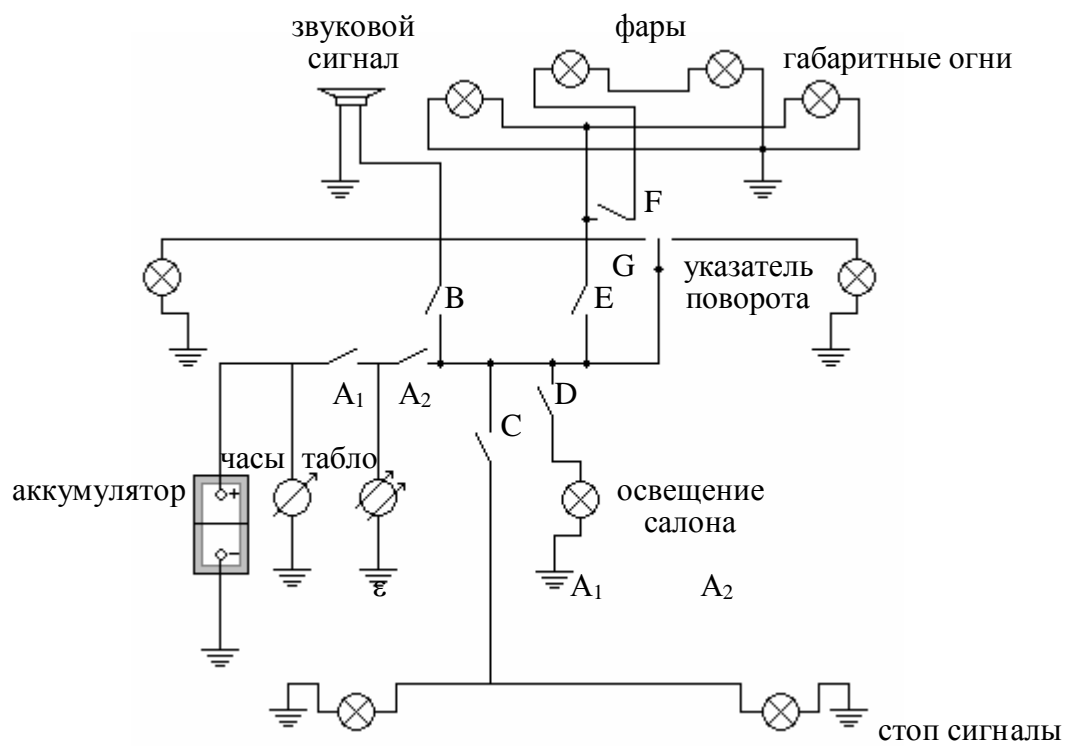
$$P_2 = P_{H2} \cdot \left(\frac{U}{U_H} \cdot \frac{P_{H1}}{P_{H1} + P_{H2}} \right)^2 = 32,65 \text{ Вт}.$$

2.7. Некоторые применения постоянного электрического тока

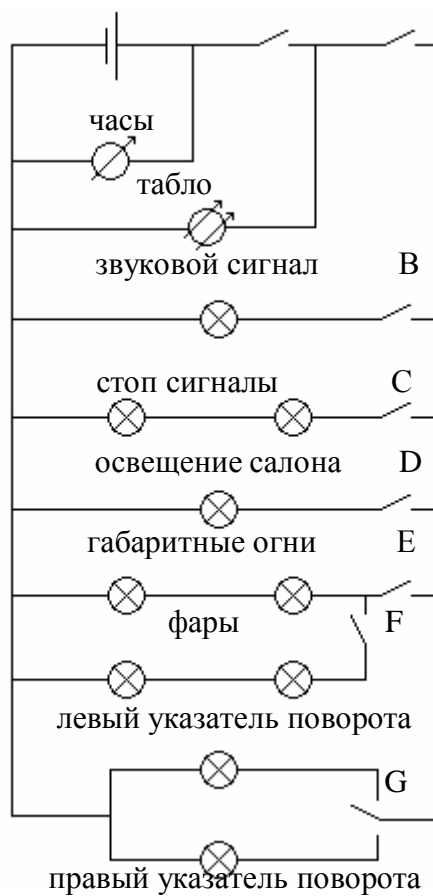
Постоянный электрический ток широко используется в электрических схемах подвижного железнодорожного состава, троллейбусов, трамваев, автомобилей, а также в микроэлектронике. Рассмотрим два примера использования постоянного тока в современных автомобилях.

Многофункциональная схема электропитания автомобиля

На рис.2.16 представлена принципиальная и электрическая схема энергопитания автомобиля. Несмотря на ее многофункциональность и кажущуюся сложность, она достаточно проста. Все потребители подключаются к источнику напряжения (аккумулятору) параллельно. Это позволяет в случае выхода из строя одного или нескольких электрических приборов цепи нормально выполнять свои функции оставшимся.



а.



б.

Рис.2.16

На схеме часы постоянно подключены к аккумулятору. Замыкание ключей A_1 и A_2 приводит к включению электрического сигнального табло, указывающего на наличие ряда функциональных систем в электрической схеме. В зависимости от необходимости выполнения автомобилем определенных действий с помощью системы ключей подключаются соответствующие приборы. Обратите внимание, что включение габаритных огней первично по отношению к фарам. Электрическая схема, представленная на рис.2.16, позволяет дальнейшее ее усложнение в зависимости от задач, поставленных потребителем перед разработчиком. К ней может быть подключена системы безопасности, контроля климатом в салоне, кондиционер и т.д.

Датчик уровня горючего в баке автомобиля

На рис.2.17 изображено принципиальное устройство электромеханического прибора для измерения уровня бензина в баке современного автомобиля.

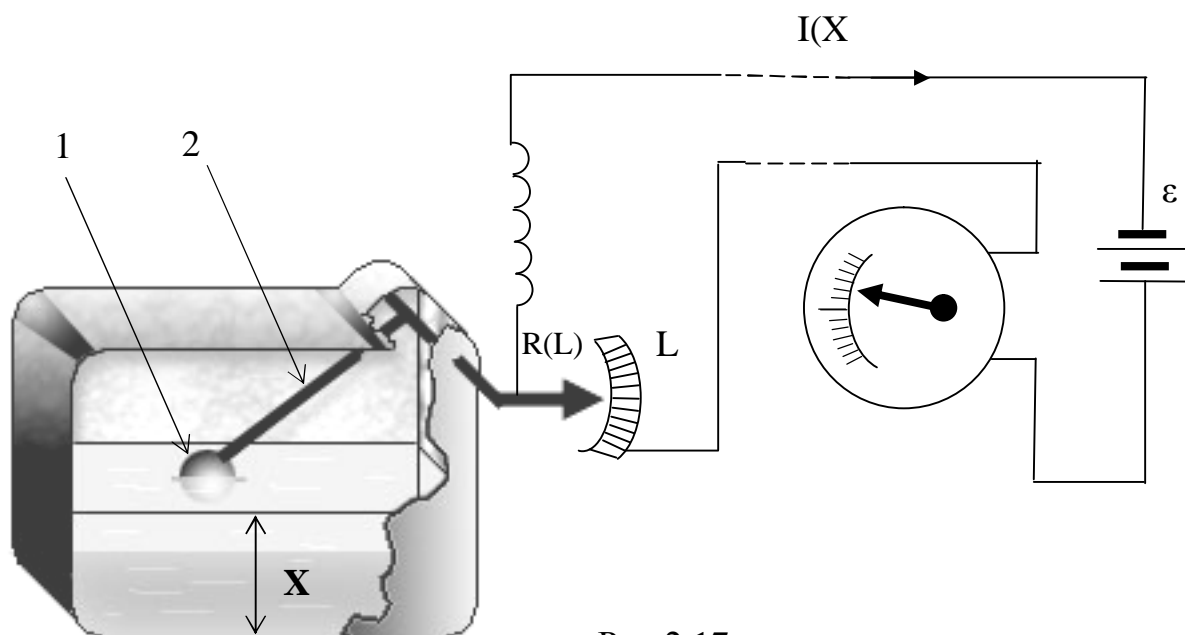


Рис.2.17

В механической части этого прибора высота уровня X горючего воспринимается поплавком 1, который при его изменении с помощью рычажной передачи 2 перемещает движок по поверхности реостата R . Эта часть устройства определяет соответствие между измеряемой величиной X и длиной перемещения L движка, т.е. $L = L(X)$.

Реостат или реостатный измерительный преобразователь является электромеханической частью электрической цепи устройства. Его равномерная намотка позволяет установить функциональную зависимость сопротивления R реостата от длины L перемещения и, тем самым, от измеряемого уровня X бензина в баке, т.е. $R = R(L(X))$. В электрической цепи все ее элементы: эдс ε источника питания и его внутреннее сопротивление, сопротивления подводящих проводов и т.д, кроме сопротивления R реостата являются постоянными величинами. Выполнение этих условий обеспечивает

однозначную взаимосвязь между силой тока в цепи и уровнем бензина в баке автомобиля. Эта взаимосвязь определяется законом Ома для полной цепи

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

где r – сопротивления всех элементов цепи, кроме реостата. Если шкалу электроизмерительного прибора A (амперметра) проградуировать не в единицах силы тока, а в единицах измеряемого уровня, то его показания будут соответствовать количеству оставшегося топлива в баке автомобиля.

Основные положения

- **Электрический ток** – направленное движение заряженных частиц.
- **Направление тока проводимости** – направление движения в электрическом поле положительно заряженных частиц.
- **Постоянный электрический ток** – ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени.
- **Диэлектрики** – вещества, не проводящие электрического тока.
- **Проводники** – вещества, в которых под действием внешнего электрического поля возникает электрический ток.
- **Источник тока (энергии, напряжения)** – устройство, в котором происходит разделение зарядов сторонними силами, совершение над ними работы и ее запас.
- **Сторонние силы** – силы неэлектростатического происхождения, осуществляющие разделение зарядов в источнике тока и перемещающие эти заряды против сил электрического поля внутри источника тока.
- **Электродвижущая сила (эдс)** – характеристика запасенной зарядом электрической энергии внутри источника тока

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

ЭДС совпадает с напряжением между полюсами разомкнутого источника тока.

- **Закон Ома для участка цепи без эдс (однородный проводник)** –
$$U = IR$$

- **Закон Ома для участка цепи с эдс (неоднородный проводник)** –

$$Ir = U + \varepsilon$$

где ε – алгебраическая сумма всех эдс источников (аккумуляторов, термопар, генераторов и т.д.), включенных в рассматриваемый участок цепи.

- **Закон Ома для замкнутой цепи с сосредоточенной эдс** –

$$\varepsilon = IR + Ir$$

- **Электрическое сопротивление** –
1. величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току, зависящая от геометрических и электрических свойств проводника, а также температуры

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S},$$

$$R = R_0 (1 + \alpha t).$$

2. структурный элемент электрической цепи, включаемый в цепь для регулирования силы тока.

- **Последовательное соединение источников тока** –

соединение источников электрической энергии, при котором положительный полюс предыдущего источника соединяют с отрицательным полюсом последующего.

- **Параллельное соединение источников тока** –

соединение источников электрической энергии, при котором все их положительные полюсы присоединены к одному концу проводника, а отрицательные – к другому.

- **Работа тока** – мера превращения энергии электрического тока в другие виды энергии.

- **Работа сторонних сил –**

$$A = \varepsilon I t$$

- **Работа тока на участке цепи –**

$$A = U q = I U t.$$

- **Закон Джоуля – Ленца –**

определяет количество теплоты Q , выделяющееся в проводнике с сопротивлением R за время t при прохождении по нему тока I

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}.$$

- **Мощность электрического тока –**
количество электрической энергии передаваемой потребителям на участке цепи в единицу времени

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

- **Мощность источника тока –**

$$P = \varepsilon I$$

количество электрической энергии, передаваемое потребителям во всей замкнутой цепи в единицу времени.

Обозначения, используемые в главе 2

I - сила тока;

q - электрический заряд;

\vec{j} - плотность тока;

dS - элемент поверхности;

ε - эдс источника тока;

ε_0 - эдс батареи источников тока;

$A_{ст}$ - работа сторонних сил;

k - коэффициент упругости пружины;

$\Delta\varphi$ - разность потенциалов;

R - сопротивление проводника;

R_0 - сопротивление проводника при 0°C ;

r - внутреннее сопротивление проводника;

r_0 - внутреннее сопротивление батареи источников;

g - проводимость;

U - напряжение;

L - длина проводника;

n - концентрация заряженных частиц;

n, m - количество проводников в цепи (источников тока) и т.д;

S - площадь поперечного сечения;

τ - среднее время движения частиц между двумя столкновениями;

ρ_0 - удельное сопротивление при 0°C ;

ρ - удельное сопротивление проводника;

A - работа тока;

Q - количество тепла;

P - мощность тока.

Тесты для электронного экзамена

T2.1 Если сила постоянного тока в проводнике 6,5 А, то за 5 ч через его поперечное сечение пройдет электрический заряд, равный

- 1) $1,28 \cdot 10^4$ Кл 2) $1,17 \cdot 10^5$ Кл 3) $3,73 \cdot 10^6$ Кл 4) $1,12 \cdot 10^7$ Кл 5) $5,67 \cdot 10^8$ Кл

T2.2 Если через поперечное сечение проводника площадью 5 мм² за 10с проходит количество электричества 100 Кл, то плотность тока равна

- 1) $2 \cdot 10^6$ А/м² 2) $3 \cdot 10^7$ А/м² 3) $4 \cdot 10^8$ А/м² 4) $5 \cdot 10^9$ А/м² 5) $6 \cdot 10^{10}$ А/м²

T2.3 Если сила тока в проводнике 1,6 А, то за 1 с через его поперечное сечение проходит число электронов равное

- 1) $6,1 \cdot 10^{19}$ 2) $5 \cdot 10^{19}$ 3) $1 \cdot 10^{19}$ 4) $4,2 \cdot 10^{19}$ 5) $7,2 \cdot 10^{19}$

T2.4 Если по проводнику в течение 365 дней протекает ток силой 1 А, то масса электронов, прошедших через поперечное сечение проводника за это время, равна (отношение заряда электрона к его массе $1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг)

- 1) 0,15 г 2) 0,20 г 3) 0,25 г 4) 1,2 г 5) 0,18 г

T2.5 Если за 4 с сила тока в проводнике линейно возрастает с 1 А до 5 А, то через поперечное сечение проводника за это время проходит заряд, равный

- 1) 12 Кл 2) 11 Кл 3) 44 Кл 4) 23 Кл 5) 6,7 Кл

T2.6 Если сила тока в проводнике линейно возрастает с 1 А до 5 А и при этом через поперечное сечение проводника проходит заряд 24 Кл, то время, за которое это происходит, равно

- 1) 2 с 2) 4 с 3) 6 с 4) 8 с 5) 10 с

T2.7 Если за 3 с сила тока в проводнике линейно возрастает от некоторого начального значения до 8 А и при этом через поперечное сечение проводника проходит заряд 18 Кл, то начальное значение силы тока равно

- 1) 1А 2) 2А 3) 3А 4) 4А 5) 5А

T2.8 Если за 6 с сила тока в проводнике линейно возрастает от 2 А до некоторого конечного значения и при этом через поперечное сечение проводника проходит заряд 15 Кл, то конечное значение силы тока равно

- 1) 1А 2) 2А 3) 3А 4) 4А 5) 5А

T2.9 Если за 2 с сила тока в проводнике линейно возрастает с 3 А до 11 А, то зависимость силы тока от времени имеет вид

- 1) $I(t) = 4t + 3$ 2) $I(t) = 4t - 3$ 3) $I(t) = -4t + 3$ 4) $I(t) = -4t - 3$ 5) $I(t) = 2t + 4$

T2.10 Если за 2 с сила тока в проводнике линейно возрастает с 3 А до 11 А, то зависимость заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника от времени, имеет вид

- 1) $q(t) = 4t^2 + 3$ 2) $q(t) = 4t^2 - 3$ 3) $q(t) = -4t^3 + 3$ 4) $q(t) = 2t^2 + 3t$ 5) $q(t) = 2t^2 - 3t$

T2.11 Если зависимость силы тока от времени имеет вид $I(t) = 5t + 1$, то за 4 с от начала отсчета времени через поперечное сечение проводника проходит заряд, равный

- 1) 12 Кл 2) 11 Кл 3) 44 Кл 4) 23 Кл 5) 6,7 Кл

T2.12 Если зависимость силы тока от времени имеет вид $I(t) = 0,5t^2$, то во временном интервале от 1 до 3 с через поперечное сечение проводника проходит заряд, равный

- 1) 1,2 Кл 2) 11 Кл 3) 3,4 Кл 4) 4,3 Кл 5) 6,7 Кл

T2.13 Если в металлическом проводнике протекает ток силой 32 мкА, то через поперечное сечение проводника проходит $2 \cdot 10^5$ электронов за время, равное

- 1) 10^{-5} с 2) 10^{-6} с 3) 10^{-7} с 4) 10^{-8} с 5) 10^{-9} с

T2.14 Размерность плотности тока в системе СИ выражается соотношением

- 1) $\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$ 2) $\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ 3) $\frac{\text{Кл}}{\text{м}}$ 4) $\frac{\text{А}}{\text{с}}$ 5) $\frac{\text{А}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$

T2.15 Если при плотности тока 1 А/мм² сила тока в проводнике 314 А, то диаметр провода равен

- 1) 2 мм 2) 2 см 3) 1 мм 4) 1 см 5) 0,2 мм

T2.16 Если длина цилиндрической медной проволоки 240 м и ее поперечное сечение 0,4 мм², то при удельном сопротивлении меди $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, сопротивление проволоки равно

- 1) 27,34 Ом 2) 12,42 Ом 3) 1,74 Ом 4) 4,86 Ом 5) 10,2 Ом

T2.17 Если сопротивление цилиндрической алюминиевой проволоки 4 Ом, диаметр поперечного сечения 1 мм, то при удельном сопротивлении алюминия $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, длина проволоки равна

- 1) 135 м 2) 112 м 3) 182 м 4) 98 м 5) 116 м

T2.18 Если длина цилиндрического медного провода 1 км, его сопротивление 10 Ом, то при удельном сопротивлении $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и плотности $8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ меди, масса провода равна

- 1) 9,2 кг 2) 18 кг 3) 15,1 кг 4) 6,38 кг 5) 5,3 кг

T2.19 Если масса медного цилиндрического провода 1 кг, его сопротивление 5 Ом, то при удельном сопротивлении $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и плотности $8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ меди, длина провода равна

- 1) 135 м 2) 112 м 3) 182 м 4) 98 м 5) 116 м

T2.20 Если масса медного цилиндрического провода 1 кг, его сопротивление 5 Ом, то при удельном сопротивлении $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и плотности $8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ меди, площадь поперечного сечения провода равна

- 1) 0,2 мм² 2) 0,62 мм² 3) 0,5 мм² 4) 2,3 мм² 5) 6,2 мм²

T2.21 Если два цилиндрических проводника, медный и алюминиевый, имеют одинаковую длину и одинаковое сопротивление, то отношение массы медного провода к массе алюминиевого равно (удельное сопротивление меди и алюминия: $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; плотность меди и алюминия 8900 кг/м³, 2700 кг/м³)

- 1) 2 2) 2,5 3) 3,2 4) 4 5) 4,6

T2.22 Если длина цилиндрического медного провода в 10 раз больше, чем длина алюминиевого, а их массы одинаковы, то отношение сопротивлений этих проводников равно (удельное сопротивление меди и алюминия: $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; плотность меди и алюминия 8900 кг/м³, 2700 кг/м³)

- 1) 300 2) 250 3) 200 4) 1 5) 82

T2.23 Если температурный коэффициент сопротивления меди $4,3 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ и при 0°C сопротивление цилиндрического проводника 4 Ом, то при 50°C его сопротивление равно

- 1) 27,34 Ом 2) 12,42 Ом 3) 1,74 Ом 4) 4,86 Ом 5) 10,2 Ом

T2.24 Если при 20°C сопротивление цилиндрического проводника 25 Ом, а при 35°C – 25,17 Ом, то температурный коэффициент сопротивления этого проводника равен

- 1) $3,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹ 2) $5,8 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹ 3) $6 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹ 4) $2,5 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹ 5) $4,5 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹

T2.25 Если температурный коэффициент сопротивления вольфрама $4,6 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ и при 20°C сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания 20 Ом, то температура этой нити под напряжением 220 В и силе тока в ней 0,8 А, равна

- 1) 1502°C 2) 2347°C 3) 3047°C 4) 3591°C 5) 4005°C

T2.26 Если температурный коэффициент сопротивления вольфрама $4,6 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ и при 20°C сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания 20 Ом, то при температуре этой нити 2394°C, находящейся под напряжением 220 В, сила тока в ней равна

- 1) 1 А 2) 2 А 3) 3 А 4) 4 А 5) 5 А

T2.27 Если температурный коэффициент сопротивления вольфрама $4,6 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ и при 20°C сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания 20 Ом, то при температуре этой нити 2394°C и силе тока в ней 0,5 А, нить находится под напряжением, равным

- 1) 220 В 2) 127 В 3) 110 В 4) 20 В 5) 22 В

T2.28 Если при напряжении 220 В на вольфрамовой нити лампы накаливания и токе 0,8 А в ней, температура нити 2400°C, а при некоторой другой температуре сопротивление нити 30 Ом, то значение этой температуры равно (температурный коэффициент сопротивления вольфрама $4,6 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹)

- 1) 15,2°C 2) 23,5°C 3) 30,7°C 4) 68,1°C 5) 40,5°C

T2.29 Если при напряжении 220 В на нити лампы накаливания и токе 1 А в ней температура нити 2400°C, то при температуре 20°C сопротивление нити равно (температурный коэффициент сопротивления нити $5 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹)

- 1) 2,7 Ом 2) 12,8 Ом 3) 13,4 Ом 4) 18,6 Ом 5) 10,2 Ом

T2.30 Если при последовательном соединении двух проводников их эквивалентное сопротивление 20 Ом, а при параллельном соединении – 5 Ом, то сопротивления проводников равны

- 1) 2 Ом; 18 Ом 2) 12 Ом; 8 Ом 3) 13 Ом; 7 Ом 4) 15 Ом; 5 Ом 5) 10 Ом; 10 Ом

T2.31 Если три сопротивления 2 Ом, 5 Ом и 10 Ом соединить параллельно, то эквивалентное сопротивление такой цепи равно

- 1) 2 Ом 2) 1,25 Ом 3) 3,4 Ом 4) 8,5 Ом 5) 5,2 Ом

T2.32 Если электрическая цепь состоит из двух параллельно соединенных проводников 2 Ом и 3 Ом и подсоединенного последовательно к ним сопротивления 4 Ом, то эквивалентное сопротивление такой цепи равно

- 1) 2 Ом 2) 1,25 Ом 3) 3,4 Ом 4) 8,5 Ом 5) 5,2 Ом

T2.33 Если эквивалентное сопротивление трех параллельно соединенных сопротивлений 30 Ом и они относятся как 1:3:5, то сопротивление второго из них равно

- 1) 312 Ом 2) 125 Ом 3) 234 Ом 4) 138 Ом 5) 52 Ом

T2.34 Если участок электрической цепи представляет собой бесконечное число параллельно соединенных сопротивлений величины которых образуют последовательность: $r, qr, q^2r \dots q^n r \dots (q > 1)$, то эквивалентное сопротивление R такой цепи равно

- 1) $r(1 - \frac{1}{q})$ 2) $r(q - \frac{1}{q})$ 3) $r(\frac{1}{q} - 1)$ 4) $r(\frac{1}{q} - q)$ 5) $\frac{r}{1 - q}$

T2.35 Если проводник сопротивлением 200 Ом разрезают на несколько равных частей и при их параллельном соединении получают эквивалентное сопротивление 2 Ом, то число частей равно

- 1) 4 2) 8 3) 10 4) 12 5) 15

T2.36 Если четыре сопротивления по 300 Ом каждое соединяют сначала последовательно, затем параллельно, то эквивалентное сопротивление во втором случае по сравнению с первым

- 1) увеличивается в 4 раза 2) увеличивается в 16 раз 3) уменьшается в 4 раза
4) уменьшается в 16 раз 5) не изменяется

T2.37 Если электрический обогреватель с сопротивлением 44 Ом включен в цепь с постоянным напряжением 220 В, то сила протекающего через него тока равна

- 1) 1 А 2) 2 А 3) 3 А 4) 4 А 5) 5 А

T2.38 Если при напряжении 6 В сила тока в проводнике 2 мкА, то его сопротивление равно

- 1) 2,7 МОм 2) 12 МОм 3) 1 МОм 4) 3 МОм 5) 10 МОм

T2.39 Если за минуту через поперечное сечение проводника с сопротивлением 5 Ом проходит заряд 2,88 кКл, то разность потенциалов на его концах равна

- 1) 220 В 2) 127 В 3) 110 В 4) 240 В 5) 22 В

T2.40 Если к проводнику сопротивлением 5 Ом приложено напряжение 10 В, то через его поперечное сечение пройдет 10^{20} электронов за время, равное

- 1) 2 с 2) 4 с 3) 6 с 4) 8 с 5) 10 с

T2.41 Если батарея, замкнутая на сопротивление 5 Ом, дает ток в цепи 5 А, а замкнутая на сопротивление 2 Ом, дает ток 8 А, то эдс батареи равна

- 1) 50 В 2) 40 В 3) 30 В 4) 20 В 5) 10 В

T2.42 Если батарея, замкнутая на сопротивление 10 Ом, дает ток в цепи 1 А, а замкнутая на сопротивление 4 Ом, дает ток 2 А, то внутреннее сопротивление батареи равно

- 1) 2,7 Ом 2) 4 Ом 3) 1 Ом 4) 8 Ом 5) 2 Ом

T2.43 Если в замкнутой цепи сила постоянного тока 5 А, сопротивление нагрузки 8 Ом и внутреннее сопротивление источника тока 0,4 Ом, то эдс источника равна

- 1) 14,6 В 2) 12,7 В 3) 11 В 4) 42 В 5) 22 В

T2.44 Если в замкнутой цепи эдс источника тока 12 В, сопротивление нагрузки 8 Ом и внутреннее сопротивление источника 2 Ом, то сила постоянного тока в цепи равна

- 1) 1,2 А 2) 2,4 А 3) 3 А 4) 4,3 А 5) 1,5 А

T2.45 Если в замкнутой цепи эдс источника тока 12 В, его внутреннее сопротивление 1 Ом, то при силе постоянного тока в цепи 3 А сопротивление нагрузки равно

- 1) 3 Ом 2) 1,2 Ом 3) 0,5 Ом 4) 8,2 Ом 5) 10,2 Ом

T2.46 Если в замкнутой цепи эдс источника тока 12 В и сопротивление нагрузки 3,5 Ом, то при силе постоянного тока в цепи 3 А внутреннее сопротивление источника равно

- 1) 3 Ом 2) 1,2 Ом 3) 0,5 Ом 4) 8,2 Ом 5) 10,2 Ом

T2.47 Если источник с эдс 12 В и внутренним сопротивлением 0,8 Ом питает цепь, состоящую из двух параллельно соединенных сопротивлений, одно из которых 4 Ом, то второе сопротивление при токе 0,6 А через него, равно

- 1) 4 Ом 2) 6 Ом 3) 8 Ом 4) 12 Ом 5) 16 Ом

T2.48 Если в цепи, состоящей из источника тока с эдс \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r и внешним сопротивлением R , внутреннее и внешнее сопротивление увеличить n раз, то напряжение на внешнем сопротивлении

- 1) увеличивается в n раз 2) увеличивается в $2n$ раз 3) уменьшается в n раз
4) уменьшается в $2n$ раз 5) не изменяется

T2.49 Если в замкнутой цепи эдс источника тока 6 В, сопротивление нагрузки 9 Ом, сила тока 0,6 А, то сила тока короткого замыкания равна

- 1) 1,2 А 2) 4 А 3) 5 А 4) 4,3 А 5) 6 А

T2.50 Если в замкнутой цепи сопротивление нагрузки 4 Ом, сила тока 1 А, сила тока короткого замыкания 5 А, то эдс источника тока равна

- 1) 14 В 2) 12 В 3) 11 В 4) 5 В 5) 22 В

- T2.51** Если в замкнутой цепи сопротивление нагрузки 4 Ом, сила тока 1 А, сила тока короткого замыкания 5 А, то внутреннее сопротивление источника тока равно
 1) 3 Ом 2) 1 Ом 3) 5 Ом 4) 1,2 Ом 5) 0,2 Ом
- T2.52** Если в замкнутой электрической цепи сила тока короткого замыкания 8,4 А, внутреннее сопротивление источника 0,6 Ом, то эдс источника тока равна
 1) 4 В 2) 5 В 3) 17 В 4) 15 В 5) 22 В
- T2.53** Если в цепи сила тока 0,8 А, сила тока короткого замыкания 8,4 А, внутреннее сопротивление источника 0,6 Ом, то сопротивление нагрузки равно
 1) 23,9 Ом 2) 10,8 Ом 3) 5,7 Ом 4) 12,3 Ом 5) 25,5 Ом
- T2.54** Если в замкнутой электрической цепи сопротивление нагрузки 5 Ом и сила тока 4,8 А, внутреннее сопротивление источника 0,2 Ом, то эдс ε источника тока равна
 1) 14 В 2) 25 В 3) 47 В 4) 15 В 5) 22 В
- T2.55** Если в замкнутой электрической цепи сопротивление нагрузки 5 Ом и сила тока 4,8 А, внутреннее сопротивление источника 0,2 Ом, то сила тока короткого замыкания равна
 1) 125 А 2) 24 А 3) 53 А 4) 43 А 5) 65 А
- T2.56** Если в замкнутой электрической цепи внутреннее сопротивление источника 0,8 Ом и сила тока короткого замыкания 5,4 А, то при сопротивлении нагрузки 4 Ом сила тока в цепи равна
 1) 2 А 2) 6,5 А 3) 2,3 А 4) 4,1 А 5) 0,9 А
- T2.57** Если в замкнутой электрической цепи напряжение на сопротивлении нагрузки 1,4 В и отношение тока короткого замыкания к току в цепи с нагрузкой 3, то эдс ε источника тока равна
 1) 4 В 2) 2,5 В 3) 4,2 В 4) 2,1 В 5) 2,8 В
- T2.58** Если в замкнутой электрической цепи сопротивление нагрузки 5,5 Ом и отношение тока короткого замыкания к току в цепи с нагрузкой 3, то внутреннее сопротивление источника тока равно
 1) 2,9 Ом 2) 1,82 Ом 3) 2,75 Ом 4) 1,25 Ом 5) 2,58 Ом
- T2.59** Если два последовательно соединенных источника тока с эдс 3,5В, 6,5В и внутренними сопротивлениями 0,12 Ом и 0,18 Ом включены согласованно, то при сопротивлении нагрузки 2 Ом сила тока в цепи равна
 1) 2,71 А 2) 4,5 А 3) 1,3 А 4) 4,35 А 5) 0,92 А
- T2.60** Если два последовательно соединенных источника тока с эдс 3,5В, 6,5В и внутренними сопротивлениями 0,12 Ом и 0,18 Ом включены навстречу друг другу, то при сопротивлении нагрузки 2 Ом сила тока в цепи равна
 1) 2,71 А 2) 4,5 А 3) 1,3 А 4) 4,35 А 5) 0,92 А
- T2.61** При последовательном, согласованном соединении n одинаковых источников тока с эдс ε и внутренними сопротивлениями r , полный ток в цепи с внешним сопротивлением R равен
 1) $\frac{\varepsilon}{R + n r}$ 2) $\frac{\varepsilon}{R + n / r}$ 3) $\frac{n \varepsilon}{R + n r}$ 4) $\frac{n \varepsilon}{R + r / n}$ 5) $\frac{\varepsilon}{R + r / n}$
- T2.62** При параллельном, согласованном соединении n одинаковых источников тока с эдс ε и внутренними сопротивлениями r , полный ток в цепи с внешним сопротивлением R равен
 1) $\frac{\varepsilon}{R + n r}$ 2) $\frac{\varepsilon}{R + n / r}$ 3) $\frac{n \varepsilon}{R + n r}$ 4) $\frac{n \varepsilon}{R + r / n}$ 5) $\frac{\varepsilon}{R + r / n}$
- T2.63** При параллельном соединении m батарей каждая из которых состоит из n последовательно и согласованно включенных источников тока с одинаковыми эдс ε и внутренними сопротивлениями r , ток во внешней цепи с сопротивлением R равен
 1) $\frac{m \varepsilon}{R + n r}$ 2) $\frac{n m \varepsilon}{R + n / r}$ 3) $\frac{n m \varepsilon}{m R + n r}$ 4) $\frac{n \varepsilon}{m R + r / n}$ 5) $\frac{m \varepsilon}{n R + r / n}$
- T2.64** Если условная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии 50 коп, а напряжение в сети 220 В, то при работе в течение 2 ч электронагревателя с сопротивлением спирали 22 Ом израсходовано электроэнергии на
 1) 1 руб. 20 коп. 2) 1 руб. 80 коп. 3) 2 руб. 20 коп 4) 3 руб. 50 коп 5) 3 руб. 80 коп
- T2.65** Если два проводника с сопротивлениями 3 Ом и 6 Ом соединены параллельно и в первом при прохождении электрического тока выделяется 20 кДж теплоты, то количество теплоты, выделяемое во втором проводнике за это же время, равно
 1) 5,5 кДж 2) 7,5 кДж 3) 10 кДж 4) 12 кДж 5) 15 кДж

T2.66 Если два проводника с сопротивлениями 3 Ом и 6 Ом соединены последовательно и в первом при прохождении электрического тока выделяется 20 кДж теплоты, то количество теплоты, выделяемое во втором проводнике за это же время, равно

- 1) 15,5 кДж 2) 20 кДж 3) 40 кДж 4) 120 кДж 5) 105 кДж

T2.67 Если при поочередном подключении двух источников тока к сопротивлению в первом случае КПД 40%, во втором – 60%, то при последовательном соединении источников тока с тем же сопротивлением КПД равно

- 1) 56% 2) 48% 3) 42% 4) 36% 5) 32%

T2.68 Если при подключении к источнику тока с ЭДС 5 В сопротивления в 1 Ом КПД источника 25%, то ток короткого замыкания равен

- 1) 1 А 2) 1,67 А 3) 2,05 А 4) 2,4 А 5) 2,88 А

T2.69 Если спираль электрической плитки уменьшить на пятую часть от первоначальной длины, то электрическая мощность плитки

- 1) уменьшается в 1,25 раза 2) увеличивается в 1,25 раза 3) уменьшается в 4 раза
4) увеличивается в 4 раза 5) не изменяется

T2.70 Если две лампочки имеют одинаковые мощности и первая из них рассчитана на напряжение 127 В, а вторая – на 220 В, то отношение сопротивления второй лампочки к сопротивлению первой равно

- 1) 1,73 2) 2,00 3) 3,00 4) 3,46 5) 4,00

T2.71 Если сечение проводника уменьшить в два раза, оставив неизменными его длину и разность потенциалов на концах, то мощность, выделяющаяся в проводнике

- 1) уменьшится в 4 раза 2) уменьшится в 2 раза 3) не изменяется 4) увеличится в 2 раза 5) увеличится в 4 раза

T2.72 Если электровоз, потребляя напряжение 10^3 В, движется со скоростью 72 км/ч под действием силы тяги $4 \cdot 10^3$ Н, то при КПД его двигателя 0,8 ток в сети равен

- 1) 87 А 2) 92 А 3) 100 А 4) 115 А 5) 120 А

Задачи для контрольных работ

2.1

На станции техобслуживания аккумулятор заряжают током силой $I = 6,5$ А в течение $t = 5$ часов. Какой заряд q сообщают аккумулятору?

2.2

Найти силу тока I через клеточную мембрану, если за $t = 4$ мкс через нее проходит $N = 1000$ положительных ионов натрия. Заряд иона Na^+ $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

2.3

Сопротивление единицы длины медной проволоки $R/L = 2,23$ Ом/м. Найти удельное сопротивление ρ меди, если диаметр проволоки $D = 0,1$ мм.

2.4

При включении в электрическую цепь проводника, имеющего диаметр $D = 0,5$ мм и длину $L = 47$ мм, напряжение на нем $U = 1,2$ В при токе в цепи $I = 1$ А. Найти удельное сопротивление ρ материала проводника.

2.5

После протягивания проволоки через волочильный станок длина ее увеличилась в $n = 4$ раза. Найти сопротивление R_2 этой проволоки, если до обработки ее сопротивление $R_1 = 20$ Ом.

2.6

Алюминиевая и медная проволоки имеют одинаковые массы и площади поперечного сечения. Найти отношение их сопротивлений $R_{\text{Al}}/R_{\text{Cu}}$. Плотности материалов $\rho_{\text{Al}}^* = 2,3 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{Cu}}^* = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ и их удельные сопротивления $\rho_{\text{Al}} = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

2.7

Два проводника g_1 , g_2 и три проводника g_1 , g_2 , g_3 при последовательном соединении имеют эквивалентные сопротивления R_1 и R_3 , соответственно. Параллельно соединенные проводники g_1 и g_3 имеют эквивалентное сопротивление R_2 . Найти сопротивления g_1 , g_2 и g_3 каждого проводника.

2.8

Из отрезка проволоки сопротивлением $R = 10$ Ом сделано кольцо. Провода, подводящие к кольцу ток, подсоединены так, что сопротивление кольца становится равным $r = 1$ Ом. Найти отношение длины любой части кольца между точками подсоединения проводов к длине кольца.

2.9

Последовательно соединены n равных сопротивлений. Во сколько раз изменится сопротивление цепи, если их соединить параллельно.

2.10

Сопротивление одного из двух последовательно включенных проводников в n раз больше сопротивления другого. Во сколько раз изменится сила тока в цепи (напряжение постоянно), если проводники включить параллельно?

2.11

В электрическую сеть последовательно включены плитка, реостат и амперметр, имеющие сопротивления $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$ и $R_3 = 0,1 \text{ Ом}$. Найти напряжения U_1 , U_2 и U_3 на каждом элементе цепи, если в ней протекает ток $I = 4 \text{ А}$.

2.12

При включении в электрическую цепь проводника диаметром $D = 0,48 \text{ мм}$ и длиной $L = 56 \text{ мм}$ на нем возникает напряжение $U = 1,8 \text{ В}$. Найти силу тока I в проводнике, если удельное сопротивление его материала $\rho = 3,85 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

2.13

Электрическая цепь составлена из четырех соединенных последовательно отрезков провода одинаковой длины и сделанных из одинакового материала. Площади сечений каждого из отрезков различны: $S_1 = 1 \text{ мм}^2$, $S_2 = 2 \text{ мм}^2$, $S_3 = 3 \text{ мм}^2$, $S_4 = 4 \text{ мм}^2$. Разность потенциалов между концами цепи $U = 100 \text{ В}$. Определить падение напряжения на каждом проводнике.

2.14

Амперметр, накоротко присоединенный к гальваническому элементу с эдс $\varepsilon = 1,6 \text{ В}$, и внутренним сопротивлением $r = 0,2 \text{ Ом}$, показывает ток $I_0 = 4 \text{ А}$. Найти показание амперметра, если параллельно ему включить сопротивление $R_{\text{ш}} = 0,1 \text{ Ом}$.

2.15

Найти электродвижущую силу элемента ε , если известно, что при увеличении сопротивления нагрузки, подключенной к элементу, в $n = 4$ раза напряжение на нагрузке увеличивается от $U_1 = 5 \text{ В}$ до $U_2 = 15 \text{ В}$.

2.16

Гальванический элемент дает на внешнее сопротивление $R_1 = 4 \text{ Ом}$ ток $I_1 = 0,2 \text{ А}$. Если же внешнее сопротивление $R_2 = 7 \text{ Ом}$, то элемент дает ток $I_2 = 0,14 \text{ А}$. Найти ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ элемента.

2.17

Аккумулятор с внутренним сопротивлением $r = 1 \text{ Ом}$ замкнут на сопротивление R . Вольтметр, подключенный к его зажимам, показывает напряжение $U_1 = 20 \text{ В}$. Показания вольтметра уменьшаются до $U_2 = 15 \text{ В}$, если параллельно R присоединяется такое же сопротивление. Определить R , считая, что сопротивление вольтметра много больше R . Сопротивлением подводящих проводов пренебречь.

2.18

Цепь состоит из аккумулятора с внутренним сопротивлением r и нагрузки с сопротивлением R . Вольтметр, подключенный последовательно и параллельно к сопротивлению R , дает одно и то же показание. Найти сопротивление вольтметра R_v .

2.19

В замкнутой цепи с эдс $\varepsilon = 6 \text{ В}$ и сопротивлением нагрузки $R = 9 \text{ Ом}$ сила тока $I = 0,6 \text{ А}$. Найти внутреннее сопротивление r источника тока и силу тока $I_{\text{кз}}$ короткого замыкания.

2.20

В замкнутой электрической цепи с нагрузкой сила тока $I = 0,8 \text{ А}$. Найти эдс ε источника тока и сопротивление R нагрузки, если внутреннее сопротивление источника $r = 0,6 \text{ Ом}$ и сила тока короткого замыкания $I_{\text{кз}} = 8,4 \text{ А}$.

2.21

Найти эдс ε источника тока и силу тока I в цепи с нагрузкой, если ее сопротивление $R = 4 \text{ Ом}$, внутреннее сопротивление источника $r = 0,8 \text{ Ом}$ и сила тока короткого замыкания $I_{\text{кз}} = 5,4 \text{ А}$.

2.22

Найти силу тока I на участке цепи, состоящего из последовательно соединенных сопротивления $R = 1 \text{ Ом}$ и аккумулятора с эдс $\varepsilon = 11,1 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,3 \text{ Ом}$, если при подключении этого участка цепи к источнику постоянного напряжения $U = 15 \text{ В}$ происходит зарядка аккумулятора.

2.23

Батарея из $n = 50$ последовательно соединенных аккумуляторов заряжается от источника постоянного напряжения $U = 120$ В током $I = 11$ А. Найти величину добавочного сопротивления R , которое необходимо ввести в цепь, если эдс аккумулятора $\varepsilon = 1,85$ В и его внутреннее сопротивление $r = 0,02$ Ом.

2.24

Аккумуляторная батарея с внутренним сопротивлением $r = 0,9$ Ом заряжается от источника постоянного напряжения $U = 14$ В током $I = 2$ А. Определить количество W запасенной аккумулятором химической энергии и количество тепла Q , выделенного в батарее за $t = 20$ мин.

2.25

Аккумуляторная батарея с эдс $\varepsilon = 10$ В подключена для зарядки к источнику напряжения $U = 17$ В. Определить количество Q тепла, выделенного в батарее за время зарядки, если запасенная за это время аккумулятором химическая энергия $W = 32720$ Дж.

2.26

Для определения эдс аккумулятора можно воспользоваться эталонным элементом. Если аккумулятор включить последовательно с эталонным элементом с эдс $\varepsilon_0 = 2$ В, в цепи возникает ток $I_1 = 0,3$ А. При последовательном включении аккумулятора в ту же цепь навстречу эталонному элементу ток во внешней цепи уменьшается до значения $I_2 = 0,1$ А и имеет направление от положительного полюса аккумулятора. Найти эдс ε аккумулятора.

2.27

n одинаковых источников тока с внутренним сопротивлением r сначала соединяют в батарею параллельно, а затем – последовательно и замыкают на внешнее сопротивление R , при котором сила тока в обоих случаях одинакова. Найти величину сопротивления R .

2.28

Батарея состоит из $n = 8$ соединенных последовательно элементов, каждый из которых имеет эдс $\varepsilon_0 = 1,5$ В и внутреннее сопротивление $r_0 = 0,25$ Ом. Внешняя цепь состоит из двух параллельно соединенных сопротивлений $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 50$ Ом. Найти напряжение U на зажимах батареи.

2.29

Два последовательно соединенных источника тока с эдс $\varepsilon_1 = 4,5$ В, $\varepsilon_2 = 6$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,3$ Ом и $r_2 = 0,2$ Ом включены согласованно. Сопротивление нагрузки $R = 10$ Ом. Найти силу I тока в цепи и разность потенциалов U_1 и U_2 на клеммах источников тока.

2.30

Два последовательно соединенных источника тока с эдс $\varepsilon_1 = 4,5$ В, $\varepsilon_2 = 6$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,3$ Ом и $r_2 = 0,2$ Ом включены согласованно. Найти силу I тока в цепи и сопротивление R нагрузки, если разность потенциалов на клеммах первого источника тока $U_1 = 3,5$ В.

2.31

Два последовательно соединенных источника тока, эдс одного из которых $\varepsilon_1 = 4,5$ В, включены согласованно. Внутреннее сопротивление источника с неизвестной эдс $r_2 = 0,2$ Ом. Найти внутреннее сопротивление r_1 первого источника и эдс второго ε_2 , если сопротивление нагрузки $R = 5$ Ом, сила тока в цепи $I = 2$ А и разность потенциалов на клеммах первого источника тока $U_1 = 3,5$ В.

2.32

Источник тока с внутренним сопротивлением r соединен с нагрузкой сопротивлением R . Во сколько раз изменится мощность, выделяющаяся во внешней цепи, если вместо сопротивления R подключить в n раз меньшее сопротивление.

2.33

Источник тока с внутренним сопротивлением r соединен с нагрузкой сопротивлением R . Какое сопротивление $R_x \neq R$ необходимо включить во внешнюю цепь вместо сопротивления R , чтобы выделяющаяся в ней мощность не изменилась?

2.34

ЭДС источника $\varepsilon = 2$ В, внутреннее сопротивление $r = 1$ Ом. Определить силу тока I , если внешняя цепь потребляет мощность $P = 0,75$ Вт.

2.35

Источник тока с эдс ε и внутренним сопротивлением r замкнут на реостат. Построить графики зависимости силы тока I в цепи, напряжения U на нагрузке, мощности P , развиваемой во внешней цепи, полной мощности P_0 и кпд η источника тока при изменении сопротивления реостата R . Найти соотношение между внешним и внутренним сопротивлениями, при котором достигается максимальная мощность во внешней цепи и соответствующее этой мощности значение кпд.

2.36

От источника тока с эдс ε и внутренним сопротивлением r необходимо получить мощность P , замыкая на внешнее сопротивление. Определить соответствующую этой мощности разность потенциалов U на сопротивлении нагрузки.

2.37

Источник тока, эдс которого ε и внутреннее сопротивление r , замкнут на внешнее сопротивление. Наибольшая мощность во внешней цепи $P_{\max} = 9$ Вт. Сила тока, соответствующая этой мощности, $I = 3$ А. Найти ε и r .

2.38

Элемент замыкается один раз на сопротивление $R_1 = 4$ Ом, другой раз на $R_2 = 9$ Ом. В обоих случаях количество теплоты, выделяющееся в сопротивлениях за одно и то же время, оказывается одинаковым. Найти внутреннее сопротивление элемента r .

2.39

Электроплитка, потребляющая мощность $P = 0,8$ кВт, присоединена к сети с постоянным напряжением $U = 120$ В проводами с сопротивлением $r = 4$ Ом. Найти сопротивление R плитки.

2.40

Под каким напряжением U необходимо передавать электрическую энергию постоянного тока на расстояние $L = 5$ км, чтобы при плотности тока $j = 2,5 \cdot 10^5$ А/м² в медных проводах двухпроводной линии электропередачи потери в линии составляли $\eta = 1\%$ от передаваемой мощности? Удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

2.41

Два чайника, каждый из которых потребляет при напряжении $U = 220$ В мощность $P = 400$ Вт, закипает при последовательном и параллельном включении за одно и то же время. Найти сопротивление r подводящих проводов.

2.42

Определить работу A электрических сил и количество теплоты Q , выделяемое в течение $t = 1$ с в аккумуляторе с эдс $\varepsilon_1 = 1,3$ В, заряжаемом током $I_1 = 1$ А, напряжение между полюсами которого $U_1 = 2$ В;

2.43

В цепи из n одинаковых проводников, соединенных параллельно и включенных в цепь, за время t_1 выделяется некоторое количество теплоты. За какое время t_2 в цепи выделяется такое же количество теплоты, если проводники соединить последовательно.

2.44

Три последовательно соединенных лампы, каждая из которых имеет сопротивление $R = 500$ Ом и рассчитана на напряжение $U_1 = 60$ В, питаются через реостат от сети с постоянным напряжением $U_2 = 220$ В. Найти мощность P тока в реостате.

2.45

Найти мощность $P_{\text{кз}}$ тока короткого замыкания батареи, состоящей из n последовательно соединенных источников тока с внутренним сопротивлением r и эдс ε каждый.

2.46

От генератора с эдс $\varepsilon = 500$ В требуется передать энергию на расстояние $L = 2,5$ км. Мощность потребителя энергии $P = 10$ кВт. Оценить потери мощности ΔP в сети, если диаметр медных подводящих проводов $d = 1,5$ мм. Удельное сопротивление меди: $\rho = 0,017$ мкОм·м.

2.47

Электродвигатель подъемного крана подключен к источнику тока с напряжением $U = 380$ В, при этом сила тока в его обмотке $I = 20$ А. Найти кпд η крана, если груз массой $m = 1$ т он поднимает на высоту $h = 19$ м за время $t = 50$ с.

2.48

Линия электропередачи длиной $L = 100$ км работает при напряжении $U = 2 \cdot 10^5$ В. Определить η кпд линии, т.е. отношение напряжения на нагрузке к напряжению, подводимому к линии, если она выполнена из алюминиевого кабеля, площадью поперечного сечения $S = 150$ мм². Передаваемая мощность $P = 3 \cdot 10^4$ кВт. Удельное сопротивление алюминия: $\rho = 0,028$ мкОм·м.

2.49

Как при последовательном, так и при параллельном соединении двух одинаковых источников на внешнем сопротивлении выделяется мощность $P_1 = 80$ Вт. Какая мощность P выделяется на этом сопротивлении, если замкнуть на него один из источников?

2.50

$n = 10$ параллельно соединенных ламп, каждая из которых имеет электрическое сопротивление $R = 0,5$ кОм и рассчитана на напряжение $U_1 = 120$ В, подсоединены последовательно к реостату. Найти мощность тока в реостате, если напряжение на участке цепи $U_2 = 220$ В.

2.51

Источник тока с внутренним сопротивлением r и эдс ε замкнут на три резистора с сопротивлением $R = 3r$ каждый, соединенные последовательно. Во сколько раз изменится сила тока в цепи, напряжение на зажимах источника и полезная мощность, если резисторы соединить параллельно?

2.52

Лифт поднимает с постоянной скоростью груз массой $m = 500$ кг. Двигатель работает от аккумуляторной батареи с напряжением $U = 24$ В при силе тока $I = 41$ А. Найти расстояние h , пройденное лифтом за $t = 1,5$ мин, если кпд двигателя $\eta = 0,75$.

2.53

Троллейбус массой $m = 11$ т движется со скоростью $v = 36$ км/час по дороге с коэффициентом трения $\mu = 0,02$. Найти сопротивление R обмотки двигателя, если его кпд $\eta = 0,8$ и напряжение в сети $U = 550$ В.

2.54

Троллейбус массой $m = 11$ т движется со скоростью $v = 36$ км/час по дороге с некоторым коэффициентом трения μ . Найти значение этого коэффициента, если сопротивление обмотки двигателя $R = 10$ Ом, его кпд $\eta = 0,8$ и напряжение в сети $U = 550$ В.

2.55

Найти количество последовательно соединенных одинаковых батареек с эдс $\varepsilon = 4,5$ В и внутренним сопротивлением $r = 3,5$ Ом, чтобы питать лампу, рассчитанную на напряжение $U = 127$ В и мощность $P = 60$ Вт.

2.56

Найти мощность P потерь в цепи, состоящей из n одинаковых источников тока с эдс ε и внутренним сопротивлением r соединенных последовательно и согласованно, если они замкнуты накоротко.

2.57

Найти кпд η линии электропередачи с сопротивлением подводящих проводов $r = 0,2$ Ом, передающих потребителю мощность $P = 10$ кВт с напряжением $U = 250$ В на входе к нему.