

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для полной цепи. Последовательное, параллельное и смешанное соединения проводников. Увеличение пределов измерения амперметра и вольтметра. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца.

Электрический ток - это направленное движение электрических зарядов по проводнику под действием сил электрического поля.

Электрический ток может быть постоянным и переменным.

Постоянным называют такой электрический ток, который с течением времени не изменяет своего направления и величины при прохождении по замкнутой электрической цепи.

Электрическая цепь. Простейшая электрическая цепь состоит из источника напряжения, потребителей и проводов, соединяющих источник напряжения с потребителями. Источниками напряжения могут быть гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы и т. п., а потребителями - лампы накаливания, электронагревательные и электроизмерительные приборы, электродвигатели и т.п.

Источник электроэнергии образует внутреннюю цепь, а все остальное - внешнюю цепь. При разрыве электрической цепи действие электрического тока прекращается.

Сила и плотность тока. Сила тока определяется электрическим зарядом, протекающего через поперечное сечение проводника в одну секунду, т. е.

$$I=q/t,$$

где I - сила тока в цепи, а;

q - электрическим зарядом, Кл;

t - время, сек.

Отношение величины тока I к площади поперечного сечения проводника S называется плотностью тока и обозначается буквой j :

$$j = I/S$$

Площадь сечения проводников измеряется в m^2 , поэтому плотность тока имеет размерность A/m^2 .

Сопротивление и проводимость. По способности проводить электрический ток твердые вещества делятся на проводники, хорошо проводящие электрический ток, и непроводники, или диэлектрики. К проводникам относятся металлы и графит, к диэлектрикам - резина, эбонит, слюда и т. д. Все проводники имеют сопротивление и проводимость.

Сопротивлением проводника R называется препятствие, оказываемое проводником электрическому току. Электрическое сопротивление проводника зависит от длины, поперечного сечения, температуры и материала. Чем больше сопротивление проводника, тем хуже он проводит электрический ток. Наибольшим сопротивлением обладает нихром (сплав никеля, хрома, железа и марганца). Из нихрома изготавливают различные нагревательные элементы.

Наименьшее сопротивление имеют серебро, медь и алюминий, из них изготавливают проводники.

Сопротивление однородного проводника:

$$R = \rho l / S,$$

где ρ - удельное сопротивление проводника; l - его длина, S - площадь сечения.

Проводимостью называется величина, обратная сопротивлению проводника, т. е.

$$\gamma = 1/R$$

За единицу сопротивления принят *Ом*. Сопротивление в омах проводника длиной 1 м, сечением 1 мм² называется удельным и обозначается ρ (ρ_0).

Удельная проводимость $\gamma = 1/\rho$, где ρ – удельное сопротивление потребителя.

Зависимость удельного сопротивления от температуры

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

где ρ и ρ_0 - удельные сопротивления соответственно при $t = 0$ °С; t – температура по шкале Цельсия; α - температурный коэффициент сопротивления.

Электродвижущая сила. Электродвижущей силой называют энергию или работу, совершаемую источником тока, которая устанавливает и поддерживает разность потенциалов, вызывает электрический ток в цепи, преодолевая ее внешнее и внутреннее сопротивление. В генераторах электродвижущая сила возникает благодаря электромагнитной индукции, а в аккумуляторах - в результате химических реакций. При холостом ходе генератора электрический ток отсутствует, а электродвижущая сила равна разности потенциалов на его зажимах. Электродвижущая сила, как и напряжение, измеряется в вольтах, а энергия - в джоулях.

Для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются *источниками постоянного тока*. Силы

неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются *сторонними силами*.

Природа сторонних сил может быть различной. В гальванических элементах или аккумуляторах они возникают в результате электрохимических процессов, в генераторах постоянного тока сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле. Источник тока в электрической цепи играет ту же роль, что и насос, который необходим для перекачивания жидкости в замкнутой гидравлической системе. Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля, благодаря чему в замкнутой цепи может поддерживаться постоянный электрический ток.

При перемещении электрических зарядов по цепи постоянного тока сторонние силы, действующие внутри источников тока, совершают работу.

Физическая величина, равная отношению работы $A_{ст}$ сторонних сил при перемещении заряда q от отрицательного полюса источника тока к положительному к величине этого заряда, называется *электродвижущей силой источника* (ЭДС):

$$\mathcal{E} = A_{ст} / q$$

Закон Ома. Закон Ома - это один из основных законов электричества. Он выражает соотношение между электродвижущей силой, сопротивлением цепи и током в ней.

Для участка цепи закон Ома определяется по следующей формуле:

$$I = U / R.$$

Для полной цепи (с источником тока) закон Ома:

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

где \mathcal{E} - ЭДС источника, r - его сопротивление (внутреннее сопротивление).

В случае однородного участка напряжение равно разности потенциалов: $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$. В случае неоднородного (с ЭДС) $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}$

Соединения потребителей. Потребители электрической энергии (резисторы, лампочки и пр.) могут включаться в электрическую цепь последовательно, параллельно и смешанно. При последовательном соединении потребителей включаются в цепь один за другим. Общее сопротивление такого соединения равно сумме отдельных сопротивлений потребителей:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

Ток во всех последовательно соединенных потребителях одинаков, т. е.

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I.$$

Напряжение на концах последовательного соединения равно сумме напряжений на отдельных потребителях:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

При параллельном включении сумма сил токов в отдельных потребителях, включенных в участок цепи, равна общей силе тока, подводимой к участку:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Напряжение на всех параллельно соединенных потребителях одинаково:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U$$

Общая проводимость этой цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$G = 1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$$

Смешанное соединение потребителей электроэнергии представляет собой совокупность последовательных и параллельных соединений.

Сопротивление которого мало по сравнению с внутренним сопротивлением источника ($R \ll r \ll r$), тогда в цепи потечет **ток короткого замыкания**:

$$I_{кз} = \varepsilon / r$$

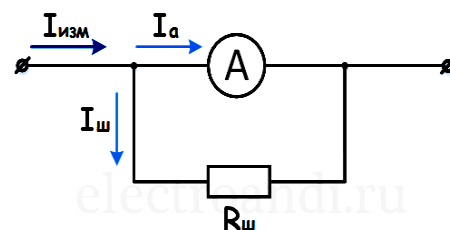
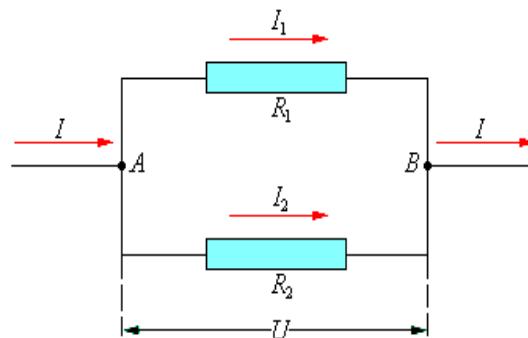
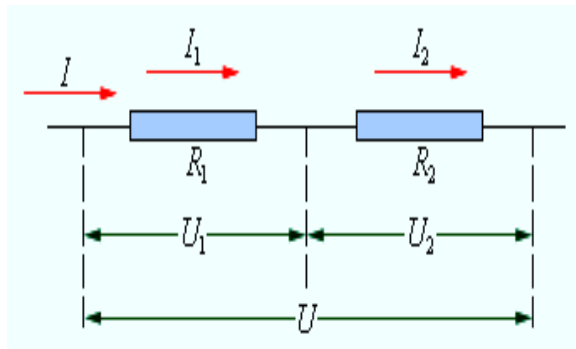
Для измерения напряжений и токов в электрических цепях постоянного тока используются специальные приборы – **вольтметры** и **амперметры**.

Амперметр измеряет силу тока, включается в цепь **последовательно**, его сопротивление достаточно мало.

Как и другие измерительные приборы, амперметр имеет свой максимальный предел измерения, в тех случаях, когда его недостаточно, применяют шунтирование амперметра.

Шунт - это сопротивление, которое подключается параллельно к зажимам амперметра, с целью увеличения диапазона измерений. Добавление шунта параллельно амперметру вызывает деление тока I , который протекает через данную цепь, на две составляющие – I_a и $I_{ш}$.

Формула для расчета сопротивления шунта:

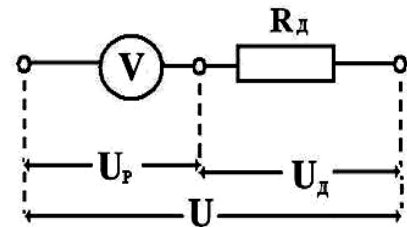


$$R_{из} = R_{д} / (1-n),$$

где n показывает, во сколько раз нужно изменить предел измерения.

Вольтметр предназначен для измерения разности потенциалов, приложенной к его клеммам. Он подключается **параллельно** участку цепи, на котором производится измерение разности потенциалов. Его сопротивление – мало.

Если потребитель нужно включить на более высокое напряжение, чем то, на которое он рассчитан, последовательно с ним включают **добавочное сопротивление**, которое «забирает» часть напряжения на себя:



$$R_{д} = R_{в}(n-1),$$

где n – отношение «нового» предела измерений вольтметра к прежнему.

Работа и мощность тока. Способность электрического тока совершать работу называют **энергией электрического тока**. Работа источника энергии зависит от напряжения, силы тока и времени, т. е.

$$A = UI t,$$

где A - работа источника энергии, $Вт \cdot сек$ или $Дж$;

U - напряжение, $В$;

I - сила тока, $А$;

t - время, сек.

Кроме того, работу измеряют в ватт-часах, киловатт-часах специальными приборами - счетчиками.

Мощностью называют работу, произведенную в единицу времени.

Ее подсчитывают по формуле:

$$P = A/t = UI.$$

За единицу мощности принимают работу тока в один ампер под напряжением один вольт за одну секунду. Такую единицу называют ваттом.

В обычных резисторах работа тока, эквивалентна количеству теплоты выделившейся на этом резисторе за время t , что составляет содержание **закона Джоуля - Ленца**:

$$Q = I^2 R t$$

В случае неподвижных металлических проводников, в которых не протекают химические реакции, мощность тока может быть выражена с учетом закона Ома для участка цепи в виде $P = I R = I U = U^2 / R$, мощность тока $P = I^2 R$ и работу тока $A = P t = I^2 R t$ за время t .

Однако в общем случае (для произвольных проводников, например для движущейся в магнитном поле обмотки электродвигателя) работа тока, эквивалентная работе электрического поля в проводниках, перемещающих заряды, должна быть записана как $A = UAq = Ult$.

Полная мощность источника тока:

$$P = \varepsilon I$$

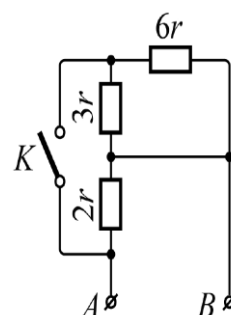
Коэффициент полезного действия источника тока:

$$\eta = (A_{\text{полезн}}/A_{\text{затрач}})100\% = (U/\varepsilon)100\%$$

**Синим цветом выделен материал для 8-9 класса.*

ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

1. Определите общее сопротивление R_{AB} электрической цепи, схема которой изображена на рисунке, при замкнутом и разомкнутом ключе K . Считайте сопротивление r известным (**6 r**; **1,5 r**).

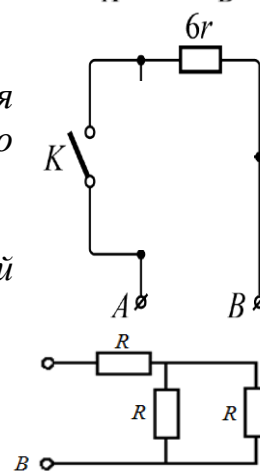


Решение

Если ключ замкнут – ток пойдет через него, минуя резисторы $2r$ и $3r$, значит, сопротивление цепи будет равно $6r$.

Если ключ разомкнут - схема представляет собой последовательное соединение резистора $6r$ с двумя параллельно соединенными резисторами $2r$ и $3r$. Следовательно, сопротивление участка цепи после размыкания ключа будет равно:

$$6r + 2r \cdot 3r / (2r + 3r) = 1,5r \text{ Ом.}$$



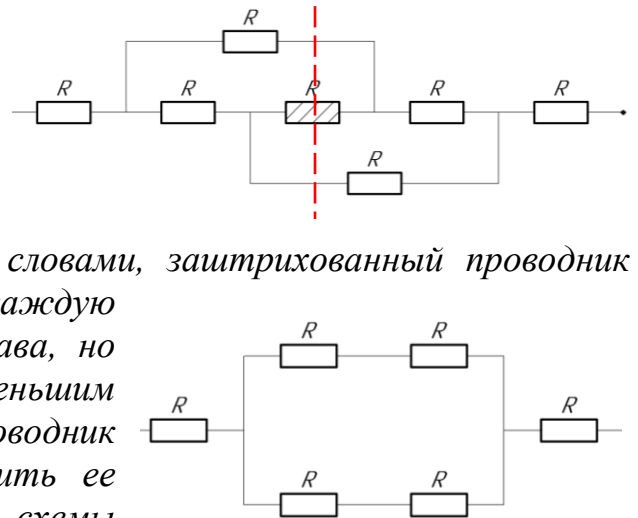
2. Участок цепи АВ состоит из пяти одинаковых проводников общим сопротивлением 5 Ом. Если в цепь включить еще два таких же, присоединив их по штриховым линиям (рис.), то каким станет сопротивление участка? (**3 Ом**)



Решение

Перерисуем представленную в условии схему в более понятном виде (см. рис.).

Схема симметрична относительно оси, значит, потенциалы на концах проводника, расположенного посередине (заштрихован на схеме), будут одинаковы, а значит через этот проводник ток не потечет (Другими словами, заштрихованный проводник добавляет лишнее сопротивление в каждую последовательную цепь – слева и справа, но есть путь, минуя его, с меньшим сопротивлением). Тогда этот проводник можно удалить из схемы, и упростить ее (рис). Сопротивление эквивалентной схемы можно найти, зная сопротивление одного проводника. Изначально пять последовательно соединенных одинаковых проводников имели сопротивление 5 Ом, т.е. с учетом $R=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5$:



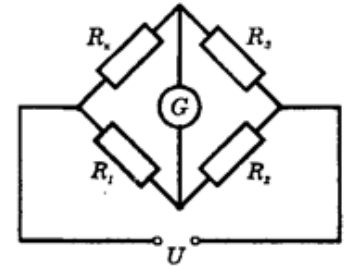
$$R_1=1 \text{ Ом}$$

Сопротивление эквивалентной схемы ищем по формуле:

$$R_{об}=R_1+R_{\parallel}+R_1, \quad 1/R_{\parallel}=1/(R_1+R_1)+1/(R_1+R_1)=2/(R_1+R_1) \rightarrow R_{\parallel}=(R_1+R_1)/2 \rightarrow R_{\parallel}=R_1$$

$$R_{об}=3R_1=3 \text{ Ом}$$

3. В цепи, изображенной на рисунке, гальванометр показывает отсутствие тока. Найти сопротивление R_x , если $R_1=4 \text{ Ом}$, $R_2=3 \text{ Ом}$, $R_3=6 \text{ Ом}$. (8 Ом)



Решение

Ток не идет через гальванометр только тогда, когда прибор включен между точками с равными потенциалами. В этом случае из цепи гальванометр можно исключить, получаем смешанное соединение (см. рис.2).

$\varphi_A = \varphi_B$, значит, падение напряжения на R_x равно падению напряжения на R_1 , а падение напряжения на R_3 равно падению напряжения на R_2 . Отсюда $U_x = U_1$, $U_3 = U_2$ (*),

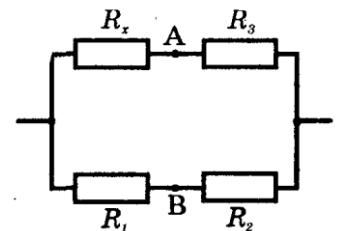
$$I_x=I_3, \quad I_1=I_2 \text{ (последовательные соединения).}$$

Воспользуемся законом Ома для участка цепи: $I=U/R$

Отсюда $U_x/U_3=R_x/R_3$, $U_1/U_2=R_1/R_2$, поэтому с учетом (*):

$$R_x/R_3=R_1/R_2 \text{ и } R_x=R_1 R_3/R_2$$

Вычисляем $R_x=8 \text{ Ом}$.



4. Лампочка накаливания, расходующая $P=54 \text{ Вт}$, погружена в прозрачный калориметр, содержащий $V=650 \text{ см}^3$ воды. За время $\tau =3 \text{ мин}$ вода нагревается на $\Delta t=3,4^\circ\text{C}$. Какая часть расходуемой лампочкой энергии

пропускается калориметром наружу в виде энергии излучения? (4,5%)

Пропускается то, что не идёт на нагревание воды.

На нагревание идет $Q = cm(t_2 - t_1)$, $m = \rho V$

Мощность, затрачиваемая на нагревание воды в калориметре:

$$P_1 = Q/t,$$

$$P_1 = \rho V c \Delta t / \tau,$$

где ρ – плотность воды, c – удельная теплоемкость воды.

Полная мощность – P , полезная P_1 , значит, на излучение идет $P - P_1$.

Искомое отношение:

$$\alpha = (P - P_1)/P = 1 - \rho V c t / (P \tau).$$

Подставим численные значения^

$$\alpha = 1 - 10^3 \times 650 \times 10^{-6} \times 4200 \times 3,4 \times 100 \% / (54 \times 180) = 4,5 \%$$

5. К источнику тока подключен реостат. При сопротивлении реостата 4 Ом и 9 Ом получается одинаковая полезная мощность 25 Вт. Найти ЭДС источника тока (25В).

Известно, что полезную мощность P (т.е. мощность, выделяющуюся во внешней цепи, а в нашем случае — в реостате) можно определить по такой формуле:

$$P = I^2 R \quad (1)$$

Силу тока в цепи I найдем по закону Ома для полной цепи:

$$I = \varepsilon / (R + r) \quad (2)$$

Подставим выражение для тока (2) в формулу (1):

$$P = \varepsilon^2 R / (R + r)^2$$

Запишем эту формулу для двух значений сопротивления реостата, описанных в условии:

$$P_1 = \varepsilon^2 R_1 / (R_1 + r)^2, \quad P_2 = \varepsilon^2 R_2 / (R_2 + r)^2 \quad (3)$$

Так как по условию $P_1 = P_2$, то:

$$\varepsilon^2 R_1 / (R_1 + r)^2 = \varepsilon^2 R_2 / (R_2 + r)^2$$

$$R_1 / (R_1 + r)^2 = R_2 / (R_2 + r)^2$$

Чтобы решить это уравнение, перемножим «крест-накрест»:

$$R_1 (R_2 + r)^2 = R_2 (R_1 + r)^2$$

Раскроем скобки в обеих частях уравнения:

$$R_1 R_2^2 + 2R_1 R_2 r + R_1 r^2 = R_2 R_1^2 + 2R_1 R_2 r + R_2 r^2$$

$$R_1 R_2^2 - R_2 R_1^2 = R_2 r^2 - R_1 r^2$$

$$R_1 R_2 (R_2 - R_1) = r^2 (R_2 - R_1)$$

$$r^2 = R_1 R_2$$

$$r = \sqrt{R_1 R_2} \quad (4)$$

Мы нашли внутреннее сопротивление источника тока r . Чтобы найти ЭДС источника ε , нужно выразить ЭДС из (3) (выразим из первой):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{P_1 (R_1 + r)^2}{R_1}}$$

$$\varepsilon = (R_1 + r) \sqrt{\frac{P_1}{R_1}}$$

Учитывая (4), окончательно получим:

$$\varepsilon = (R_1 + \sqrt{R_1 R_2}) \sqrt{\frac{P_1}{R_1}}$$

Подставим численные данные в формулу и посчитаем ответ: $\varepsilon = 25\text{В}$.

6. Измерительный прибор без шунта сопротивлением $R_{\text{пр}} = 0,28$ Ом имеет шкалу на 50 делений, цена деления 0,01 А/дел. Определить цену деления этого прибора и предельную величину измеряемого тока при подключении шунта сопротивлением $R_{\text{ш}} = 0,02$ Ом (**0,15А, 7,5А**).

Решение

Предельная величина измеряемого тока при непосредственном измерении составляет:

$$I_{\text{пр max}} = 0,01 \cdot 50 = 0,5 \text{ А.}$$

Определим отношение токов, текущих через прибор и через шунт (воспользовавшись законом Ома и тем, что шунт включают параллельно, т.е. $U_{\text{ш}} = U_{\text{пр}}$):

$$I_{\text{ш}} / I_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} / R_{\text{ш}}$$

Отсюда, максимальный ток, текущий через шунт, будет равен:

$$I_{\text{ш max}} = I_{\text{пр max}} \cdot R_{\text{пр}} / R_{\text{ш}}, \quad I_{\text{ш max}} = 7 \text{ А}$$

Тогда общий ток через шунт и прибор:

$$I_{\text{общ}} = I_{\text{ш max}} + I_{\text{пр max}}, \quad I_{\text{общ}} = 7,5 \text{ А}$$

Цена деления прибора соответственно будет:

$$C_{\text{gh}} = I_{\text{пр max}} / n = 0,15 \text{ А}$$