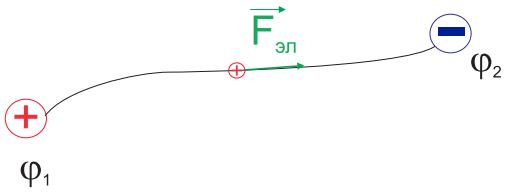
13 Постоянный ток.

13.1 Электрический ток и условия его существования.

Если два заряженных разноименными зарядами тела, соединить проводником, то произойдет перемещение электронов от одного тела к другому. Электроны будут перемещаться под действием электрического поля. Разность потенциалов между заряженными телами будет постепенно выравниваться. В этом случае говорят, что по проводнику протекает электрический ток.



Def. Электрическим током или током проводимости называется упорядоченное движение свободных заряженных частиц.

13.1.1 Условия существования тока.

Что необходимо для существования длительного тока?

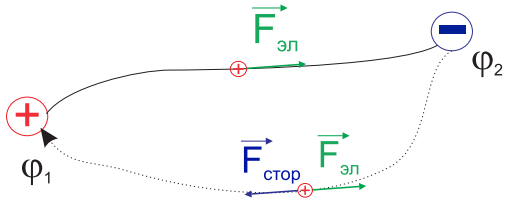
1. Наличие свободных зарядов
2. Наличие в данной среде электрического поля, энергия которого затрачивалась бы на перемещение зарядов.

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \neq 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta\varphi \neq 0$$

3. замкнутая цепь

Physics.spb.ru

Но ток, который пойдет по проводнику будет весьма кратковременным. (вспомним разряд э-ф машины). В процессе протекания тока, потенциал φ_1, будет уменьшаться, а потенциал φ_2 будет увеличиваться. В итоге потенциалы выравняются и ток прекратится. Что необходимо сделать, чтобы ток шел долгое время?



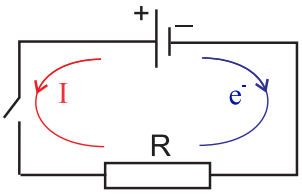
Для длительного тока нужно поддерживать постоянной разность потенциалов, для этого заряд прошедший по цепи под действием электрических сил, нужно переместить назад действуя на них неэлектрическими силами. Поэтому необходимым условием протекания длительного тока, необходимо чтобы цепь была замкнута и в ней действовали не только электрические, но и неэлектрические силы.

Для поддержания электрического тока в цепи должны работать сторонние, некулоновские силы, которые способны переносить заряды против сил поля и этим поддерживать разность потенциалов. NB!

Устройство, обеспечивающее возникновение сторонних сил - источник тока.

13.1.2 Направление тока.

Исторически сложилось так, что за направление тока принимается направление от «плюса» к «минусу», что соответствует противоположенному направлению движения электронов в металлических проводниках.



Def. За направление тока принимают условно направление движения положительно заряженных частиц.

13.2 Характеристики тока.

13.2.1 Сила тока.

Введем величину, которая бы численно характеризовала насколько большой ток протекает по проводнику.

$$i_{\text{ср}} = \frac{\Delta q}{\Delta t}; \quad i_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q' = \frac{dq}{dt}$$

Def. Ток называется постоянным, если за любые равные промежутки времени, через поперечное сечение проводника проходит один и тот же заряд.

Тогда при постоянном токе $i_{\text{ср}} = i_{\text{мгн}} = I \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = \frac{\Delta q}{\Delta t}}$

Def. Сила тока показывает какой заряд проходит через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Единица измерения:

$$[I] = A$$

Единица измерения силы тока определяется через магнитное действие токов (см. раздел «Электромагнетизм»).

Def. Ток в 1 А это такой ток, при протекании которого по двум параллельным бесконечным проводникам находящихся на расстоянии 1 м друг от друга, каждый их метр взаимодействует с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н

.

Зная ток в 1 А, можно определить единицу измерения заряда.

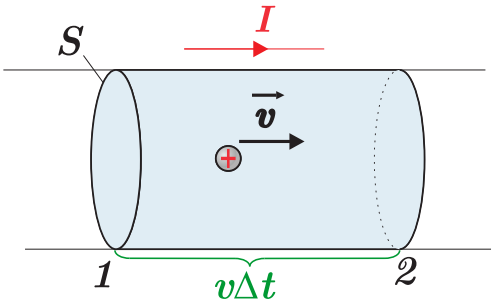
Def. 1 Кл - это заряд, который проходит через поперечное сечение проводника за 1 с при постоянном токе в 1 А

.

physics.spb.ru

13.2.2 Связь силы тока со скоростью упорядоченного движения.

Выразим силу тока через скорость упорядоченного движения частиц и их концентрацию. Введем следующие обозначения:



q – заряд частицы
v – скорость упорядоченного движения
V – объем части проводника, из которой весь заряд успеет пройти через второе сечение за данное время
n – концентрация

Рассмотрим часть проводника. Пусть за время Δt все частицы из этого объема пройдут через сечение 2, тогда

$$l = v\Delta t; \qquad V = Sl = Sv\Delta t$$

$$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{Nq}{\Delta t} = \frac{nVq}{\Delta t} = \frac{nSlq}{\Delta t} = \frac{nSv\Delta tq}{\Delta t}$$

$$\boxed{I = qnvS}$$

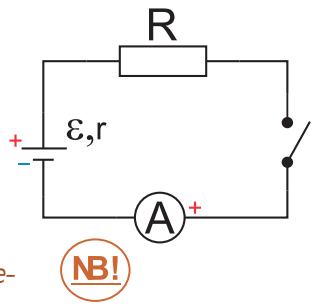
Пользуясь этой формулой можно оценить скорость упорядоченного движения свободных электронов в металлическом проводнике. Рассмотрим случай, когда по проводнику сечением $S = 1\text{мм}^2$ протекает ток $I = 10$ А. Тогда

$$v = \frac{I}{qnS} = \frac{10\text{А}}{1,6 \cdot 10^{-19}\text{Кл} \cdot 10^{29}1/\text{м}^3 \cdot 10^{-6}\text{м}^2} \approx 10^{-3}\text{м/с} = 1\text{мм/с}$$

Т.е. даже при большом токе скорость упорядоченного движения составляет всего 1 мм за секунду. При этом скорость хаотичного теплового движения составляет порядка 10^3 м/с. Поэтому ток в проводнике можно представить, как дрейф электронного облака. Более подробное описание тока в металлах, можно посмотреть в соответствующем разделе.

13.2.3 Измерение силы тока.

Для измерения силы тока используется амперметр. Принцип действия стрелочного амперметра основан на действии силы Ампера на катушку, по которой протекает измеряемый ток. О принципах работы прибора магнитоэлектрической системы будет рассказано в разделе Электромагнетизм.



Амперметр включается в цепь последовательно с тем элементом, ток через который необходимо измерить.

У амперметра постоянного тока магнитоэлектрической системы важна полярность включения, т.к. стрелка на амперметре может отклоняться только в одну сторону. Плюс амперметра должен приводить в итоге к плюсу источника. В схеме на рисунке справа, амперметр включен последовательно с резистором и измеряет ток, протекающий через него.

13.2.4 Плотность тока.

Для проводников сила тока не является объективной величиной. Вспомним плавкие предохранители. Ток через них и через всю проводку идет одинаковый, но предохранители плавятся, а провода нет. Это зависит от площади поперечного сечения проводника.

Для характеристики распределения тока по сечению проводника вводится понятие плотности тока.

$$\boxed{j = \frac{I}{S}} \Rightarrow j = qnv$$

Единицы измерения: $[j] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$

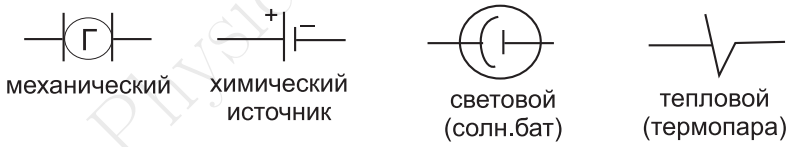
Def. Плотность тока показывает, какой ток приходится на единицу площади поперечного сечения.

13.3 Источники тока и их классификация.

Def. Источник тока - это устройство, в котором какой-либо вид энергии непрерывно преобразуется в энергию электрического поля.

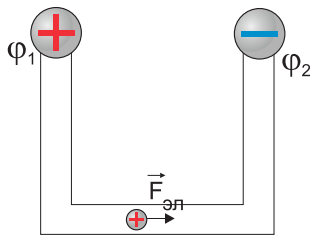
Physics.spb.ru

Классификацию проводят обычно по признаку преобразуемой энергии.



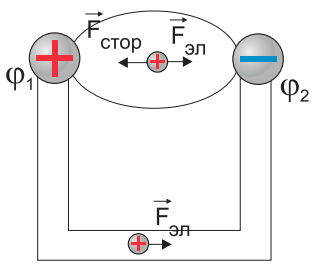
13.4 Электродвижущая сила.

Рассмотрим устройство обеспечивающее возникновение сторонних сил. Для начала рассмотрим соединение двух тел. Пусть одно заряжено положительно, а второе отрицательно.



Будем рассматривать переход положительных частиц по направлению тока. Частицы перемещаются под действием кулоновских сил и потенциал выравнивается.

Электрические(кулоновские) силы выравнивают потенциалы в проводнике.



Чтобы поддерживать разность потенциалов постоянной, необходимо наличие некулоновской силы. Таким образом на заряд внутри источника будет действовать две силы: кулоновская и сторонняя.

Для поддержания постоянного тока потребуется также замкнутость проводника.

В источнике тока положительный заряд должен перемещаться против электрического поля, т.е. от минуса к плюсу. Вспомним какая величина характеризовала работу сил электрических?

$$\Delta\varphi = -\frac{A_{\text{эл}}}{q}$$

В качестве основной характеристики источника аналогичным образом вводится понятие электродвижущей силы(ЭДС):

$$\boxed{\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}}$$

Def. ЭДС это характеристика источника которая показывает, какую работу совершают сторонние силы по перемещению единичного положительного заряда между полюсами источника.

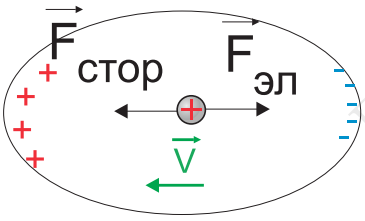
Работа сторонних сил по замкнутому контуру не равна нулю. Это подтверждается тем, что при прохождении тока по цепи выделяется энергия.

Если сторонние силы переносят заряд в сторону тока, то ЭДС положительна, если в противоположенную сторону, то ЭДС отрицательна.

physics.spb.ru

13.4.1 Процессы протекающие в источнике тока.

Разомкнутая цепь Рассмотрим источник тока в разомкнутой цепи.



Сторонние силы начинают перенсить положительные заряды в каком-то одном направлении. Это приводит к тому, что увеличивается электрическое поле и возрастает электрическая сила. В конце концов они сравниваются и разделение зарядов в источнике прекращается.

Процесс разделения зарядов в источнике и накопление их на полюсах не может происходить без конца, т.к. в результате разделения зарядов, возникает электрическое поле, мешающее электронам двигаться к отрицательному полюсу. В итоге электрические силы сравниваются со сторонними и устанавливается равновесие. При этом между полюсами устанавливается определенная разность потенциалов.

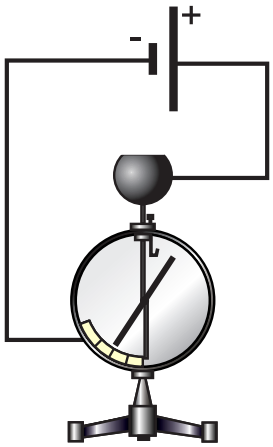
$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q} = -\frac{A_{\text{эл}}}{q} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\varepsilon = \Delta\varphi}$$

St. ➡ ***ЭДС равна разности потенциалов на полюсах разомкнутого источника тока.***

Замкнутая цепь:

Замкнем цепь. Под действием сил поля заряды будут перемещаться по проводнику, при этом заряды отрицательного полюса(откуда уходят электроны) и заряды положительного полюса(куда электроны приходят) начнет уменьшаться. Равновесие сил, действующих на электроны внутри источника нарушится в пользу сторонних сил и они вновь начнут переносить электроны от плюса к минусу.

Однако, сторонние силы не успевают полностью восстановить первоначальную разность потенциалов между полюсами источника. Поэтому при замкнутой цепи разность потенциалов меньше, чем в разомкнутой цепи.



Измерение ЭДС

Мы умеем измерять разность потенциалов только при помощи электрометра.

На практике ЭДС измеряется подключением к источнику высокоомного вольтметра

Вольтметр всегда измеряет разность потенциалов между теми точками, к которыми он подключен.

13.5 Напряжение.

В электрических цепях принято выделять два вида цепей в зависимости от наличия или отсутствия сторонних сил на участке.

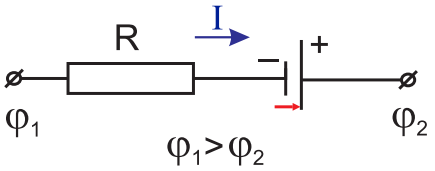
Def. Участок цепи принято называть однородным, если на нем работу совершают только электрические силы.

Примером однородного участка цепи является участок содержащий резистор.

Def. Участок цепи принято называть неоднородным, если нам нем работу совершают не только электрические силы, но и сторонние.

Примером неоднородного участка цепи является участок содержащий в себе источник ЭДС или участок с электродвигателем постоянного тока.

Рассмотрим неоднородный участок цепи с ЭДС. Будем считать, что на концах этого участка $\varphi_1 > \varphi_2$. Тогда ток по нему будет течь от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом, т.е. слева направо.



При таком включении источника сторонние силы будут совершать положительную работу, т.к. они переносят положительный заряд от минуса источника к его плюса и в данном случае это будет совпадать с направлением тока.

$$A_{\text{эл}} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$
$$A_{\text{стор}} = q\varepsilon$$

Если сложить данные уравнения, то получится

$$A_{\text{всех сил}} = A_{\text{эл}} + A_{\text{стор}} = q((\varphi_1 - \varphi_2) \pm |\varepsilon|)$$

$$\boxed{U = \frac{A_{\text{всех сил}}}{q}}$$

Def. Напряжение - это физическая величина, которая показывает, какую работу совершают все силы по перемещению единичного положительного заряда.

$$\Rightarrow \quad \boxed{U = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm |\varepsilon|}$$

Единицы измерения: $[U] = B$

Приборов измеряющих напряжение нет!

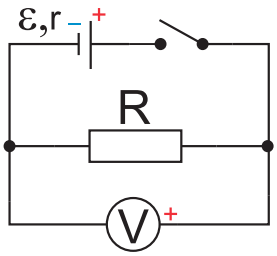
NB!

Возникает вопрос, а что же тогда измеряет вольтметр?

Def. Вольтметр это прибор измеряющий разность потенциалов.

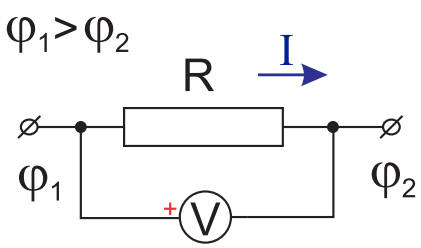
physics.spb.ru

Вольтметр включается всегда параллельно с тем участком, на котором необходимо измерить разность потенциалов. При этом так же, как в случае с вольтметром, необходимо соблюдать полярность включения. Плюс от вольтметра должен приводить к плюсу источника.



В некоторых случаях измеренная разность потенциалов будет совпадать с другими величинами. Рассмотрим следующие частные случаи:

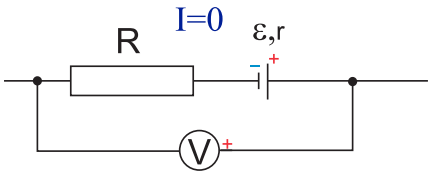
1. $\varepsilon = 0$ на участке нет источника, тогда



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -(\varphi_2 - \varphi_1) = |\Delta\varphi|$$

В этом случае вольтметр измерит разность потенциалов, которая будет совпадать с электрическим напряжением.

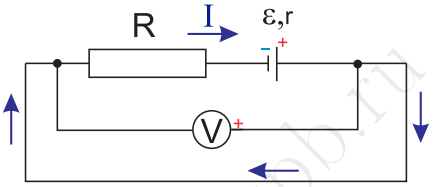
2. Разомкнутая цепь: $A_{\text{всех сил}} = 0 \quad \Rightarrow \quad A_{\text{стор}} = -A_{\text{эл}}$



$$U = 0 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$$

Если внешняя цепь разомкнута и на данном неоднородном участке тока нет, то вольтметр будет показывать ЭДС источника.

3. Полная цепь:$\varphi_1 = \varphi_2 \quad \Rightarrow \quad \Delta\varphi = 0 \quad \Rightarrow$



$$U = \varepsilon \quad A_{\text{эл}} = 0$$

В полной цепи электрические силы совершают работу и на внешнем участке и на внутренним, а т.к. они являются консервативными, то их работа по перемещению заряда по замкнутой цепи будет равна нулю.

Следовательно в замкнутой цепи работу будут совершать только сторонние силы в источнике, поэтому напряжение будет совпадать с ЭДС.

Вольтметр же так включенные в цепь, будет показывать ноль, т.к. разность потенциалов на внешнем участке цепи, на котором нет сопротивления, будет равна нулю.

physics.spb.ru

13.6 Сопротивление. Закон Ома для участка цепи.

Экспериментально определим зависимость силы тока от напряжения. Такую зависимость принято называть вольт-амперной характеристикой, в данном случае проводника. Для этого можно собрать установку, которая будет позволять менять разность потенциалов на проводнике (рис.1).

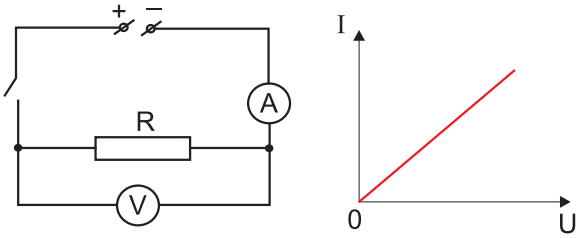


Рис. 1:

$$I = f(U)$$

Т.к. проводник является однородным участком цепи без ЭДС, то $U = \Delta\varphi$.

Опыт покажет, что при небольших токах получается следующая зависимость

$$I \sim U \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = kU}$$

где к - проводимость проводника. На практике чаще используют величину обратную проводимости, которую называют сопротивлением:

$$\frac{1}{k} = R \quad \Rightarrow \quad \boxed{R = \frac{U}{I}}$$

Def. Сопротивление - характеристика проводника, которая показывает какое напряжение нужно приложить к проводнику, чтобы в нем возник ток в 1 А

$$R = \frac{U}{I} \qquad [R] = \text{Ом} \qquad 1\text{Ом} = \frac{1B}{1A}$$

Def. 1 Ом - сопротивление такого проводника, приложив к которому разность потенциалов в 1 В, через него начнет течь ток в 1 А

.

Повторим эксперимент, зафиксировав разность потенциалов на концах проводника с переменным сопротивлением (рис.2) и исследуем зависимость

$$I = f(R)$$

Эту зависимость исследовал в 1827 году немецкий физик Георг Симон Ом. Он установил, что

$$I \sim \frac{1}{R}$$

В результате объединяя результаты двух опытов получаем закон Ома для однородного участка цепи

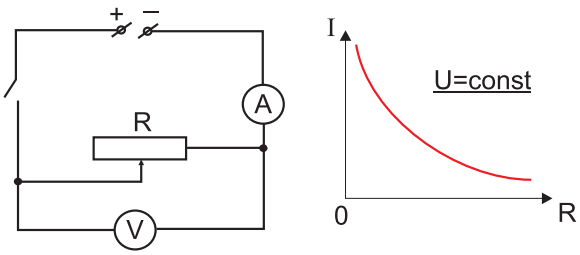


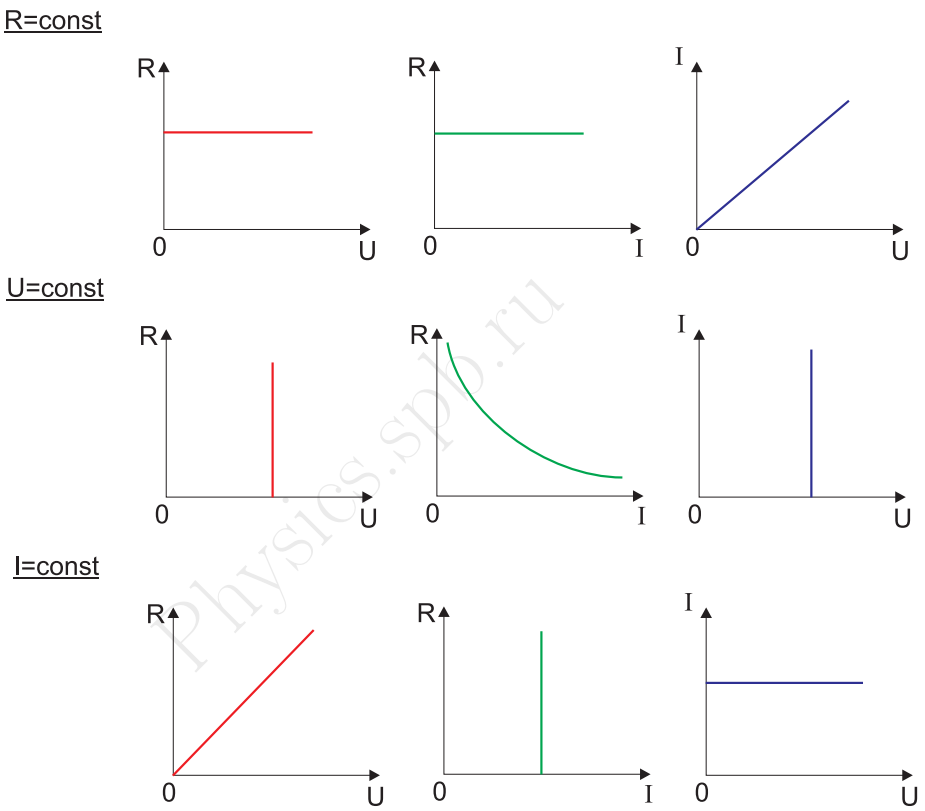
Рис. 2:

$$\begin{matrix} I \sim \frac{1}{R} \\ I \sim U \end{matrix} \Rightarrow \boxed{I = \frac{U}{R} = \frac{\Delta\varphi}{R}}$$

Physics.spb.ru

Law ➡ *Закон Ома для однородного участка цепи* *Сила тока на однородном участке цепи прямо пропорционально разности потенциалов на концах данного участках и коэффициентом пропорциональности является величина обратная сопротивлению данного участка*

Функциональные зависимости.

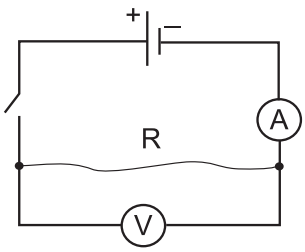


Physics.spb.ru

Удельное сопротивление.

Сопротивление зависит от формы проводника, его размеров и материалов проводника.
Опыт:

$$\begin{matrix} R \sim l \\ R \sim \frac{1}{S} \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad R \sim \frac{l}{S} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R = \rho \frac{l}{S}}$$



где ρ - удельное сопротивление

$$\rho = \frac{RS}{l} \quad \Rightarrow \quad [\rho] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} = 10^{-6} \text{Ом} \cdot \text{м}$$

Экспериментальное определение удельного сопротивления:

Что для этого необходимо? Источник тока, ключ, амперметр, вольтметр, микрометр, линейка

$$R = \rho\frac{l}{S} = \frac{U}{I} \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{US}{Il}; \qquad S = \frac{\pi d^2}{4} \quad \Rightarrow$$

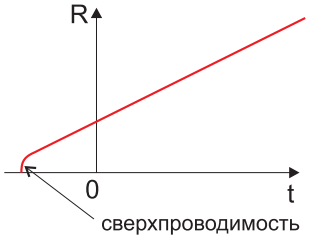
$$\rho = \frac{U\pi d^2}{4Il}$$

Необходимо измерить силу тока, напряжение, длину и диаметр проводника

Зависимость от температуры $\rho = f(T)$.

Экспериментально, как только что было разобрано, установили, что такие измерения при разных температурах дают разные результаты.

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \cdot t^\circ} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot t^\circ)}$$



где ρ_0 - удельное сопротивление при 0°C, α- термические коэффициент сопротивления

$$[\alpha] = C^{-1}(K^{-1})$$

Def. Термический коэффициент сопротивления показывает чему равно относительное изменение удельного сопротивления проводника при изменении температуры на 1 градус

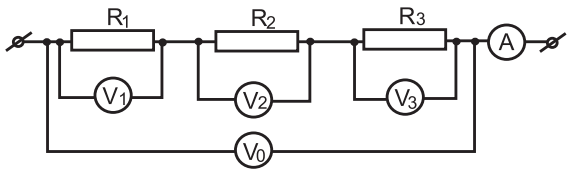
Physics.spb.ru

13.7 Последовательное и параллельное сопротивление проводников.

13.7.1 Последовательное соединение.

Def. Последовательное соединение - это соединение потребителей в ряд, один за другим, так что ток проходит по всем потребителям не разветвляясь.

$$q_0 = q_1 = q_2 = q_3 | : \Delta t \quad \Rightarrow \quad \frac{q_0}{\Delta t} = \frac{q_1}{\Delta t} = \frac{q_2}{\Delta t} = \frac{q_3}{\Delta t}$$



$$\boxed{I_0 = I_1 = I_2 = I_3}$$

Место включения амперметра безразлично

$$U_0 = \frac{A_0}{q} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{q} = \frac{A_1}{q} + \frac{A_2}{q} + \frac{A_3}{q}$$

$$\boxed{U_0 = U_1 + U_2 + U_3}$$

Def. Сопротивление, при включении которого вместо всех других проводников, находящихся между двумя точками цепи ток и напряжение остаются неизменными называется общим.

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{I_0} = \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} + \frac{U_3}{I_3}$$

$$\boxed{R_0 = R_1 + R_2 + R_3}$$

Physics.spb.ru

Свойства последовательного соединения:

1. $R_1 = R_2 = R_3 = ... = R_n = R \quad \Rightarrow \quad R_0 = nR$
2. Если к цепи добавить последовательно проводник, то общее сопротивление увеличится
3. Общее сопротивление всегда больше наибольшего

$$R_1 = 1Om; R_2 = 1000Om \quad \Rightarrow \quad R_0 = 1001Om$$

4. Напряжения на участках последовательного соединения относятся, как сопротивления

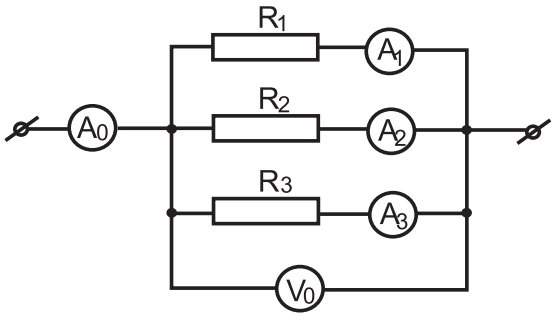
$$\begin{aligned} U_1 &= IR_1 \\ U_2 &= IR_2 \\ U_3 &= IR_3 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$$

Применение: деление напряжения, включение амперметра, дополнительное сопротивление к вольтметру

13.7.2 Параллельное соединение.

Def. Параллельное соединение - соединение при котором ток разветвляется, а ветви находятся под одинаковым напряжением

$$\boxed{U_1 = U_2 = U_3 = U_0}$$



$$q_0 = q_1 + q_2 + q_3 | : \Delta t \quad \Rightarrow \quad \frac{q_0}{\Delta t} = \frac{q_1}{\Delta t} + \frac{q_2}{\Delta t} + \frac{q_3}{\Delta t}$$

$$\boxed{I_0 = I_1 + I_2 + I_3}$$

$$I = \frac{U}{R} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{R_0} = \frac{I_0}{U_0} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\boxed{\frac{1}{R_0} = + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Physics.spb.ru

Свойства параллельного соединения:

1. $R_0 = \frac{R}{n}$
2. Если к цепи добавить параллельно проводник, то общее сопротивление уменьшится.
3. Общее сопротивление всегда меньше наименьшего

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1000}{1001} Om < 1 Om$$

4. Токи в ветвях параллельного соединения относятся обратно сопротивлениям этих участков

$$\begin{matrix} I_1 = \frac{U}{R_1} \\ I_2 = \frac{U}{R_2} \\ I_3 = \frac{U}{R_3} \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$$

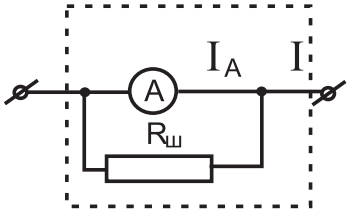
Применение: подключение потребителей, подключение вольтметра, шунты к амперметру

Замечание: при анализе явлений, происходящих на участке цепи нельзя забывать, что участок является частью полной цепи. При изменении состава полной цепи на любом участке изменится полный ток и происходит перераспределение напряжения на всех участках.

13.8 Шунтирование и добавочные сопротивления.

13.8.1 Шунтирование амперметра.

Необходимо увеличить диапазон токов, которые может измерять амперметр в n раз.($\frac{I}{I_A} = n$). Известно, что сопротивление амперметра равно R_A. Найти сопротивление шунта.



$$I_A + I_ш = I$$

$$\frac{I_A}{I_ш} = \frac{R_ш}{R_A} \quad \Rightarrow \quad R_ш = R_A \frac{I_A}{I - I_A} = R_A \frac{1}{\frac{I}{I_A} - 1}$$

$$\boxed{R_ш = \frac{R_A}{n-1}}$$

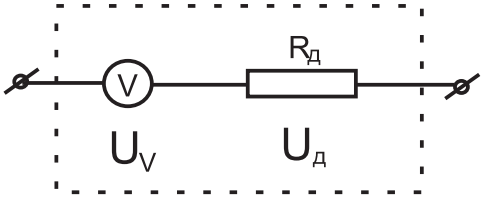
13.8.2 Добавочное сопротивление к вольтметру.

Необходимо увеличить диапазон напряжений, которые может измерять вольтметр в n раз.($\frac{U}{U_v} = n$). Известно, что сопротивление вольтметра равно R_v. Найти добавочное сопротивление.

$$U_v + U_д = U$$

$$\frac{U_v}{U_д} = \frac{R_v}{R_д} \quad \Rightarrow \quad R_д = R_v \frac{U_д}{U_v} = R_v \frac{U - U_v}{U_v} = R_v \frac{\frac{U}{U_v} - 1}{1}$$

$$\boxed{R_д = R_v(n-1)}$$



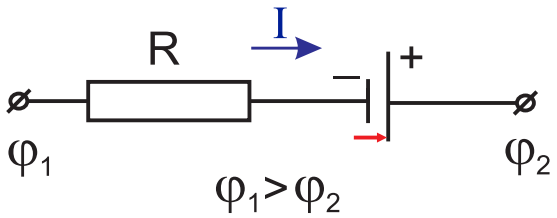
Physics.spb.ru

13.9 Закон Ома для полной цепи.

13.9.1 Закон Ома для неоднородного участка цепи.

Вспомним закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R_{\text{уч}}} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm |\varepsilon|}{R_{\text{уч}}}$$

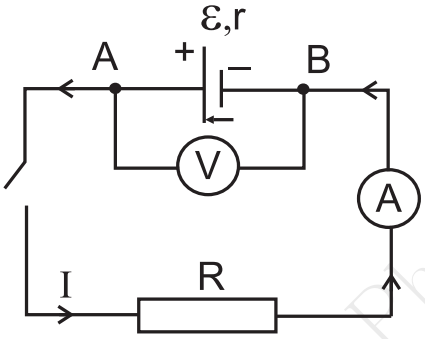


До сих пор мы говорили об однородном участке цепи, т.е. для учатка где сторонние силы не совершали работу:

$$A_{\text{стор}} = 0 \quad \Rightarrow \quad I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{\text{уч}}}$$

13.9.2 Полная замкнутая цепь

Рассмотрим теперь замкнутую цепь в которой присутствует электродвижущая сила.



Укажем направление протекания тока от плюса к минусу и пользуясь определением напряжения, запишем напряжение на участке AB и BA, по направлению тока:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = IR$$
$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A + \varepsilon = Ir$$

Плюс перед ЭДС связан с направлением сторонних сил и с направлением обхода контура. Ток через ЭДС равен току через сопротивление R, т.к. они соединены последовательно. Если сложить полученные выражения, тогда

$$\varepsilon = I(R + r) \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = \frac{\varepsilon}{R + r}}$$

Law ➡ *Закон Ома для полной цепи* *Ток в цепи прямо пропорционален электродвижущей силе и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи*

Из закона Ома следует, что

$$\boxed{\varepsilon = IR + Ir}$$

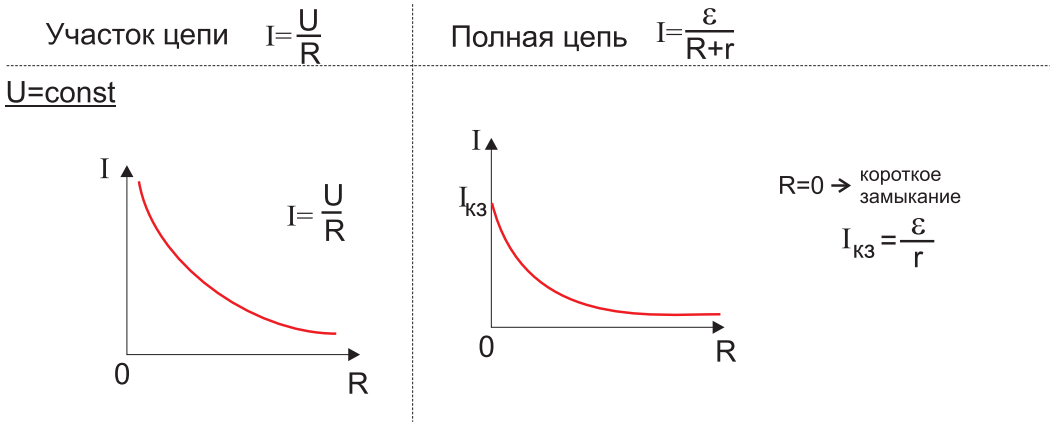
Первое слагаемое это напряжение на внешней части цепи, а второе - на внутренней.

Тогда в случае замкнутой цепи вольтметр будет показывать напряжение на внешнем участке цепи, а в случае разомкнутой - ЭДС.

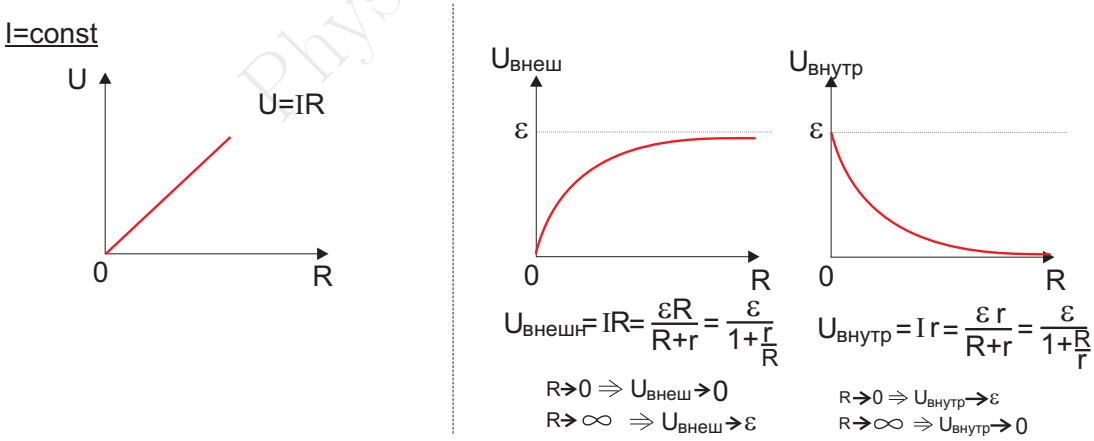
Physics.spb.ru

Функциональная зависимость.

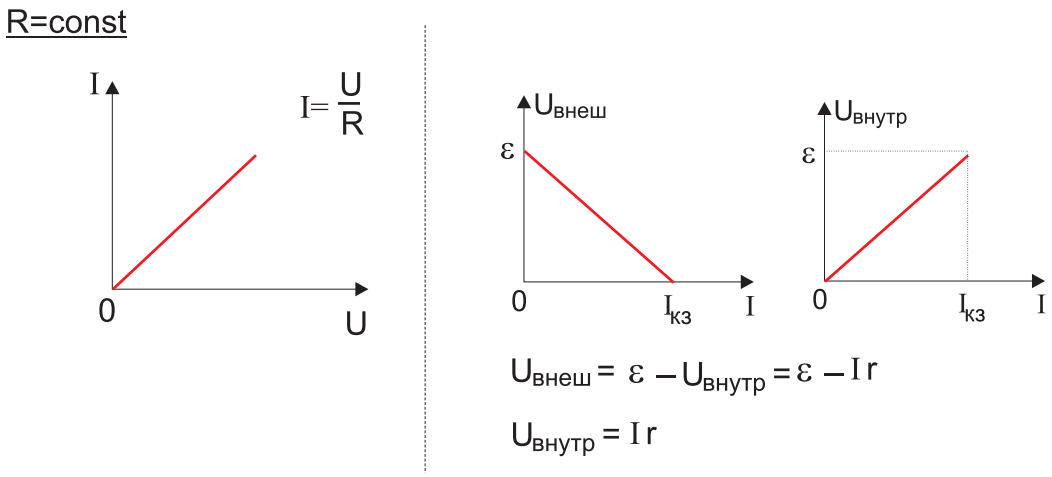
Проанализируем зависимости $I(R), U(R), I(U)$ сравнивая закон Ома для однородного участка цепи и закон Ома для полной цепи.



При уменьшении внешнего сопротивления до нуля (это эквивалентно соединению точек A и B), происходит короткое замыкание. Но в отличие от закона Ома для однородного участка цепи, ток в реальной цепи не будет возрастать до бесконечности, а только до некоторого максимального значения $I_{\text{к.з.}}$. Это связано с тем, что в реальной цепи ЭДС имеет внутреннее сопротивление r и следовательно ток хоть и будет большим, но не будет бесконечным.



При увеличении внешнего сопротивления падение напряжения на внешнем участке будет увеличиваться(r и R, соединены последовательно) и в пределе будет происходить только на внешнем участке цепи. А на внутреннем все с точностью до наоборот.



Поскольку максимальный ток ограничен не бесконечностью, а током короткого замыкания, графики будут являться прямыми ограниченными отрезками.

13.9.3 Пример задачи на закон Ома для полной цепи.

Пример 1

Дана электрическая цепь с двумя источниками (см. рисунок);$\varepsilon_1 = 2,5B$; $r_1 = 0,1$Ом; $\varepsilon_2 = 1,1B$; $r_1 = 0,05$ Ом; последовательно с которыми включен резистор с сопротивлением $R = 5$ Ом. Найти силу тока и показания вольтметра, подключенного к точкам A и B.

Дано:

$\varepsilon_1 = 2,5B$

$r_1 = 0,1$Ом

$\varepsilon_2 = 1,1B$

$r_1 = 0,05$ Ом

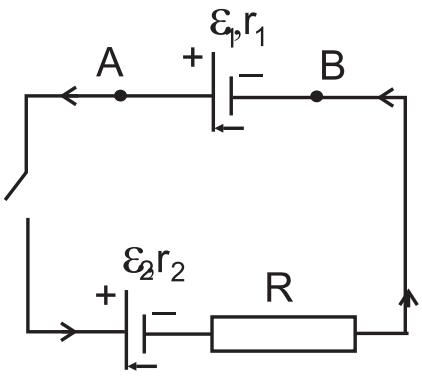
$R = 5$ Ом

$I - ?$

$\Delta\varphi_{AB} - ?$

Решение:

Поскольку вольтметр измеряет разность потенциалов между двумя точками, то помимо силу тока нужно найти разность потенциалов между точками A и B.



Выберем направление тока против часовой стрелки, т.е. $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$. Если ответ получится отрицательным, то это будет означать, что ток течет в направлении противоположенном выбранному.

Запишем закон ома для участков AB и BA и сложим получившиеся уравнения:

$$\begin{cases} \varphi_A - \varphi_B - |\varepsilon_2| = I(R + r_2) \\ \varphi_B - \varphi_A + |\varepsilon_1| = Ir_1 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad |\varepsilon_1| - |\varepsilon_2| = I(R + r_1 + r_2) \quad \Rightarrow \quad I = \frac{|\varepsilon_1| - |\varepsilon_2|}{R + r_1 + r_2} = 0,27A$$

Подставляем полученное значение силы тока в первое уравнение системы

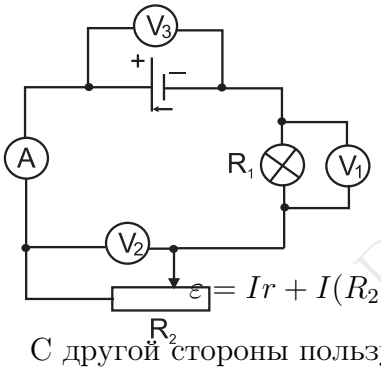
$$\Delta\varphi_{AB} = \frac{|\varepsilon_1| - |\varepsilon_2|}{R + r_1 + r_2}(R + r_2) + |\varepsilon_2| = 2,47B$$

Ответ: $I = 0,27$ A; $\Delta\varphi_{AB} = 2,47B$.

13.9.4 Пример задачи на изменение состава цепи.

Пример 2 Ползунок реостата переместили влево, как изменились показания приборов?

(Видеоразбор примера задачи.)



$$I = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2 + r}$$

$$R_2 \downarrow \quad \Rightarrow \quad I \uparrow$$

$$U_1 = IR_1 \quad \Rightarrow \quad U_1 \uparrow$$

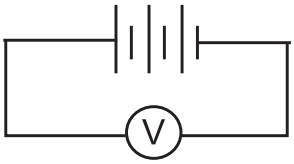
$$\varepsilon = Ir + I(R_2 + R_1) \quad \Rightarrow \quad U_3 = I(R_2 + R_1) = \varepsilon - I \uparrow r \quad \Rightarrow \quad U_3 \downarrow$$

С другой стороны пользуясь законами последовательного соединения

$$U_3 \downarrow = U_2 + U_1 \uparrow \quad \Rightarrow \quad U_2 \downarrow$$

13.10 Соединения источников в батареи.

13.10.1 Последовательное соединение.



Пользуясь законами последовательного соединения и аддитивностью работы получаем:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

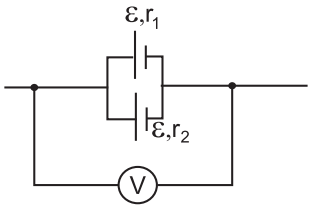
$$r = r_1 + r_2 + r_3$$

Если включено последовательно n одинаковых источников

$$I = \frac{n\varepsilon}{R + nr}$$

13.10.2 Параллельное соединение.

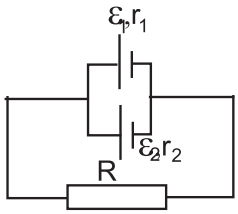
Если параллельно включено n одинаковых источников с одинаковым ЭДС , тогда



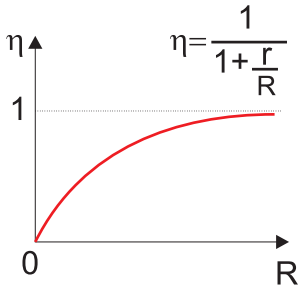
$$\varepsilon_{\text{батареи}} = \varepsilon$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

Если же параллельно включены разные источники, тогда надо для каждого конкретного случая решать задачу, разбивая электрическую цепь на однородные и неоднородные участки.



13.10.3 КПД источника.



$$A_{\text{полн}} = A_{\text{стор}} + A_{\text{эл}} = A_{\text{стор}} = q\varepsilon$$

$$\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{полн}}} = \frac{qU_{\text{внеш}}}{q\varepsilon} = \frac{U_{\text{внеш}}}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)}$$

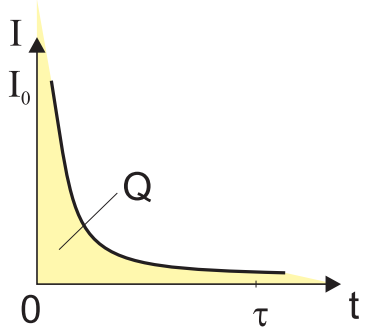
$$\boxed{\eta = \frac{R}{R+r}}$$

Physics.spb.ru

13.11 Конденсатор в цепи постоянного тока.

St. ➡ *Конденсатор в цепи постоянного тока является разрывом цепи, т.е. сопротивление конденсатора по постоянному току – бесконечно большое.*

Но при этом ток в цепи протекает в первое мгновение, пока конденсатор не зарядится за время τ. При этом сила тока нелинейно убывает от значения I_0 до полного нуля, т.к. с увеличением заряда на конденсаторе, следующим зарядам уже сложнее придти на обкладки конденсатора, т.е. при зарядке сопротивление конденсатора быстро увеличивается до бесконечности.



Рассмотрим пример расчета конденсатора в цепи переменного тока. Схема (рис.3) рассматривается в предположении, что конденсатор уже полностью заряжен. Будем считать, что $R_1, R_2, R_3, C, \varepsilon, r$ известны и нужно найти заряд на обкладках конденсатора.

В подобных задачах, после зарядки конденсатора в подходящих к конденсатору проводах заряд не перемещается и ток через резистор R_3 отсутствует.

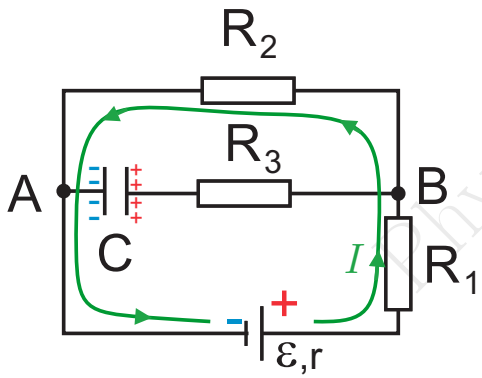


Рис. 3:

$$I_3 = 0$$

Поэтому разность потенциалов на обкладках конденсатора буде совпадать с разностью потенциалов между точкой A и точкой B.

$$\Delta\varphi_C = \varphi_B - \varphi_A = \Delta\varphi_{AB}$$

т.к. участок AB подключен параллельно с R_2, то

$$\Delta\varphi_{AB} = \Delta\varphi_{R_2}$$

По закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R_1 + R_2}$$

и по закону Ома для однородного участка цепи

$$\Delta\varphi_{R_2} = IR_2 = \frac{\varepsilon R_2}{r + R_1 + R_2}$$

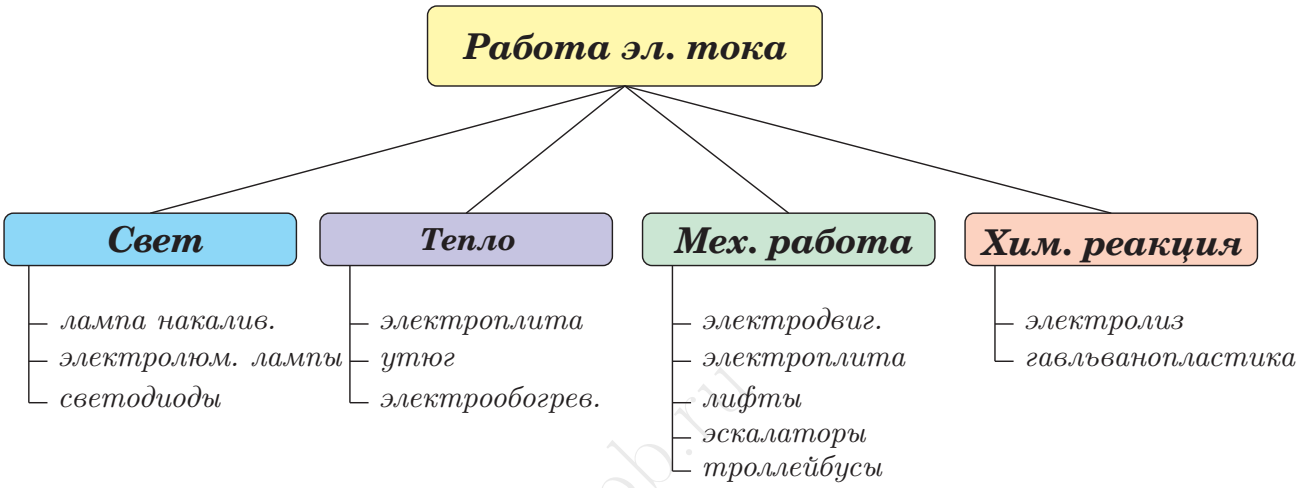
Тогда заряд на обкладках конденсатора

$$q = C\Delta\varphi_C = C\Delta\varphi_{R_2} = \frac{C \cdot \varepsilon \cdot R_2}{r + R_1 + R_2}$$

13.12 Работа и мощность тока.

Когда мы начинали рассматривать ток, то говорили, что источник тока преобразует какой-либо вид энергии в энергию электрического тока. А для чего вообще существует ток? С помощью тока удобно например передавать энергию на расстоянии. Но в итоге, для использования энергии тока необходимо научиться преобразовывать его опять в другие виды энергии.

Работа электрического тока может быть преобразована в следующие виды энергии:



Стоит отметить, что во всех случаях преобразование будет сопровождаться выделением тепла. **NB!**

$$A_{\text{эл}} = q|\Delta\varphi| = I|\Delta\varphi|\Delta t; \quad \boxed{A_{\text{эл тока}} = I|\Delta\varphi|\Delta t}$$

$$1\text{Дж} = 1\text{А} \cdot 1\text{В} \cdot 1\text{с}$$

$$P = \frac{A}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \boxed{P = I|\Delta\varphi|}$$

Def. Электрическая мощность показывает какую работу совершает электрический ток за единицу времени.

Единицы измерения:

$$[P] = \text{Вт} \qquad \Rightarrow \qquad 1\text{Вт} = 1\text{А} \cdot 1\text{В}$$

В качестве единицы измерения работы электрического тока обычно использую не Джоули, а кВт·часы:

$$[A] = \text{кВт} \cdot \text{ч} = 10^3\text{Вт} \cdot 3600c = 3,6 \cdot 10^6\text{Дж}$$

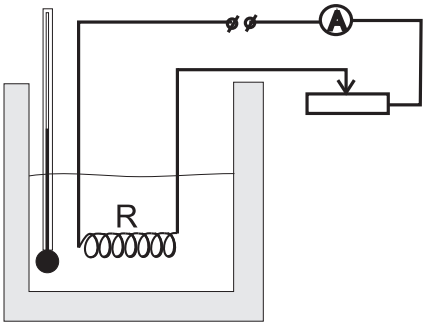
Номинальная мощность.

Def. Номинальная мощность — это установленное производителем оборудования значение, которое характеризует способность оборудования стабильно и бесперебойно функционировать при нормальных условиях эксплуатации.

Номинальная мощность соответствует рабочему диапазону напряжений и рабочему току.

13.12.1 Закон Джоуля-Ленца для однородного участка цепи.

Закон Джоуля-Ленца является экспериментальным законом, т.е. зависимость между теплом током, сопротивлением и временем установлена в ходе эксперимента.



Оценку тепла, полученного водой будем делать по формуле

$$Q = cm\Delta t^\circ$$

и будем считать, что все тепло выделившееся в нагревателе, пойдет на нагрев воды.

Силу тока в цепи меняем при помощи реостата. Кол-во теплоты которое получает вода, прямо пропорционально I^2. Если взять спираль с большим сопротивлением, то тепла выделится больше. Если греть воду большее время при прочих равных, то она получит пропорционально больше тепла.

Опыт покажет, что

$$\begin{array}{l} Q \sim I^2 \\ Q \sim R \\ Q \sim \tau \end{array} \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = I^2 R\tau}$$

Law ➡ ***Количество теплоты выделяющее в проводнике при протекании тока прямо пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени протекания тока.***

physics.spb.ru

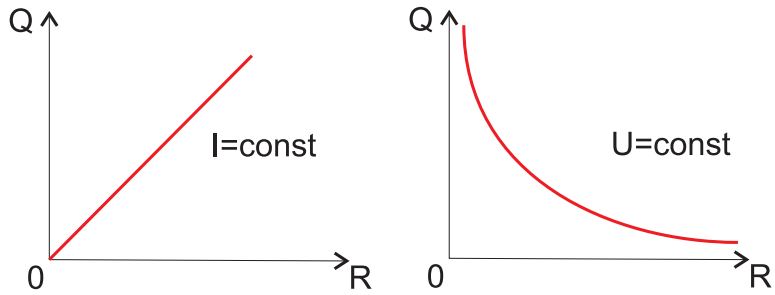
Если считать, что работа тока идет только на нагревание, то

$$A = I|\Delta\varphi|\Delta t; \qquad I = \frac{|\Delta\varphi|}{R} \quad \Rightarrow \quad Q = A = I^2 R\Delta t = \frac{|\Delta\varphi|^2}{R}\Delta t$$

Итак, обобщим полученные результаты:

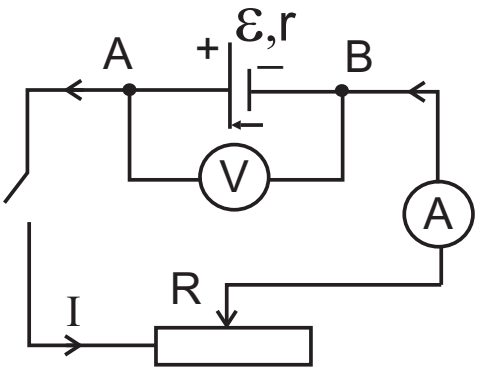
$Q = I\lvert\Delta\varphi\rvert\Delta t$	$P = I\lvert\Delta\varphi\rvert$
$Q = I^2 R\Delta t$	$P = I^2 R$
$Q = \frac{\lvert\Delta\varphi\rvert^2}{R}\Delta t$	$P = \frac{\lvert\Delta\varphi\rvert^2}{R}$

Если ток протекает через элементы одинаковый, как при последовательном соединении, то мощность выделяемая на элементах, будет прямо пропорциональна их сопротивлению. Если одинаковое напряжение, то мощность обратно пропорциональна сопротивлению.



13.12.2 Мощность во внешней цепи.

Рассмотрим полную электрическую цепь, в которой внешний участок является однородным. Эту мощность еще называют полезной мощностью в случае, когда целью протекания тока является выделение тепла в цепи.



Мощность на внешнем участке цепи будет определяться следующей формулой

$$P_{\text{внеш}} = IU_{\text{внеш}} = I^2R$$

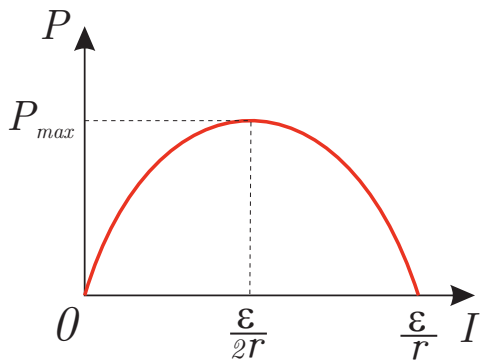
При изменении сопротивления внешней цепи, будет меняться сила тока. Определим, при каком значении сопротивления внешней цепи, в ней будет выделяться максимальная мощность.

Способ 1.

$$\begin{cases} P_{\text{внеш}} = IU_{\text{внеш}} \\ U_{\text{внеш}} = \varepsilon - Ir \end{cases} \quad \Rightarrow \quad P(I) = I(\varepsilon - Ir) = I\varepsilon - I^2r$$

Графиком функции $P(I)$ будет являться парабола, ветви которой направлены вниз и пересекают ось токов в точках:

$$I_1 = 0; \quad I_2 = \frac{\varepsilon}{r}$$



Стоит заметить, что $\frac{\varepsilon}{r}$ это максимально возможный ток в цепи – ток короткого замыкания.

Тогда, в силу симметрии параболы, максимум мощности достигается при токе:

$$I = \frac{\varepsilon}{2r} \quad \Rightarrow \quad \frac{\varepsilon}{2r} = \frac{\varepsilon}{r+R} \quad \Rightarrow \quad R = r$$

Способ 2.

Запишем закон Ома для полной цепи:

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

тогда для мощности получится следующее выражение

$$P_{\text{внеш}}(R) = I^2R = \frac{\varepsilon^2}{(R+r)^2}R$$

Мощность во внешней цепи будет нелинейно зависеть от сопротивления внешнего участка. Для того, чтобы найти экстремум функции $P_{\text{внеш}}(R)$, возьмем первую производную и приравняем ее нулю.

$$\frac{dP_{\text{внеш}}}{dR} = \varepsilon^2\left(\frac{1\cdot(R+r)^2 - R\cdot 2(R+r)}{(R+r)^4}\right) = 0$$

$$(R+r)\cdot(R+r-2R) = (R+r)(r-R) = 0 \quad \Rightarrow \quad R = r$$

Physics.spb.ru

Учитывая, что функция $P_{\text{внеш}}(R)$ начинается из нуля и возрастает, найденный экстремум является максимумом.

В итоге результат получился такой же, как в первом способе.

St. ➡ *Максимальная мощность на внешнем участке будет выделяться, когда сопротивление этого участка будет совпадать с сопротивлением источника ЭДС.*

13.12.3 Полная мощность в электрической цепи и КПД.

При этом затраченная мощность во всей цепи это мощность источника ЭДС.

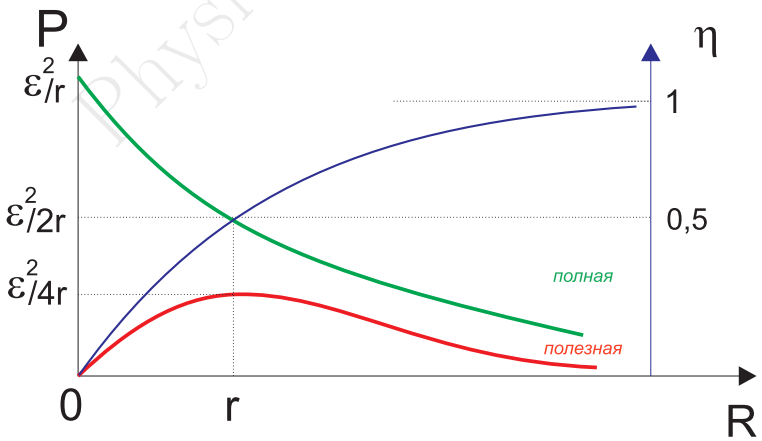
$$P_{\text{полн}} = I\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R+r}$$

Тогда КПД полной цепи будет равен:

$$\eta = \frac{P_{\text{внеш}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2} \cdot \frac{R+r}{\varepsilon^2} = \frac{R}{R+r}$$

Результат такой же, как в разделе КПД источника.

Если построить графики полной мощности, мощности во внешней цепи и КПД источника, тогда получатся следующие функциональные зависимости:



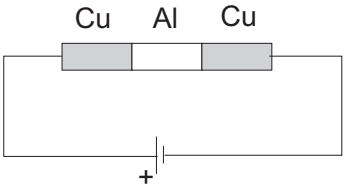
physics.spb.ru

13.13 Электрический ток в металлах.

13.13.1 Природа носителей тока в металлах.

Первая элементарная частиц – электрон, была открыта английским физиком Томсоном только в 1897 году. До этого момента в химии были известны только атомы, ионы и молекулы. Какие частицы являются свободными носителями зарядов в металлах?

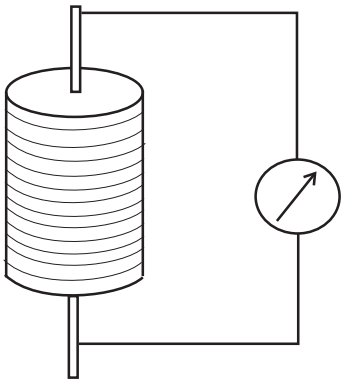
В 1901-1903 годах немецкий физик Эдуард Рикке поставил опыт, который позволил определить, что является свободным носителем заряда в металлах.



В электрическую цепь включили три прижатых друг к другу цилиндра: два медных по краям и один алюминиевый между ними. По этой цепи пропускался электрический ток в течение года. За это время прошел колоссальный заряд $3 \cdot 10^6$ Кл.

Проведя анализ Рикке не обнаружил изменения массы цилиндров, а исследование торцов стержней под микроскопом показало отсутствие проникновения атомов одного металла в другой.

Опыт Рикке показал, что прохождение через металл тока не сопровождается переносом вещества. Электропроводность металлов объясняется переносом таких частиц, которые являются общими для всех металлов и не связаны с различием в их физических и химических свойствах.



Предположение о том, что заряд переносят электроны, а не положительно заряженные частицы в физике зародилось давно. Но необходимо было это доказать, измерив заряд и массу этих частиц.

Подтверждение этих предположений были опыты Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси(1912г), Т. Стюарт и Р. Толмен (1916г). Идея была в том, что электроны обладающие массой должны подчиняться свойству инерции. Если разогнать металл, а потом резко затормозить, то свободные частицы какое-то время будут двигаться по металлу, в результате чего пойдет ток.

По гальванометру можно отслеживать направление тока.

В опытах Мандельштама-Папалекси и Стюарта-Толмена было установлено, что носителями электричества в металлах являются электроны и было измерено соотношение.

$$\frac{q_e}{m} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

St. ➡ ***Свободными зарядами в металлах являются электроны.***

Концентрация свободных электронов в металлах составляет

$$n \sim 10^{23} \text{см}^{-3}$$

13.13.2 Классическая электронная теория строения металлов(1900г).

Теория Друде-Лоренца — классическая электронная теория проводимости металлов, разработанная немецким физиком П. Друде в 1900 году и усовершенствованная Х. Лоренцем в 1904 году.

Основные положения теории:

- Носителями тока в металлах являются электроны, движение которых подчиняется законам классической механики.
- Совокупность свободных электронов можно рассматривать как некоторый идеальный газ, называемый электронным газом.
- При движении электронов в кристаллической решётке можно не учитывать столкновения электронов друг с другом. При этом среднее поле всех ионов действующее на все электроны, равно нулю. Поэтому электроны между столкновениями с ионами свободен подобно молекуле идеального газа. П
- Электроны сталкиваются только с ионами, при этом столкновение носитя абсолютно неупругий характер, т.е. при столкновении электронов с ионами электроны полностью передают ионам свою кинетическую энергию.

Physics.spb.ru

13.13.3 Средняя скорость упорядоченного и хаотичного движения электронов.

Если справедлива теория Друде-Лоренца, тогда для электронов можно применить законы термодинамики:

$$< E_k >= \frac{m_e v_{\text{хаот}}^2}{2} = \frac{3}{2}kT \quad \Rightarrow$$

$$v_{\text{хаот}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 10^5 \text{м/с}$$

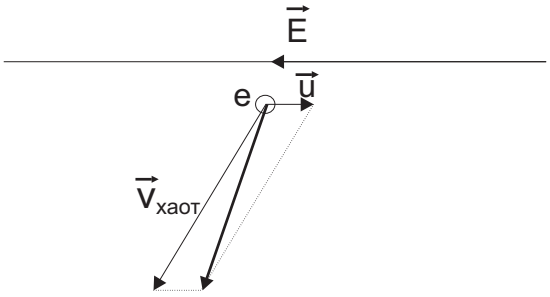
Т.е. средняя скорость хаотичного движения электронов в электронном газе при температуре 300 К составляет около 100 км/с.

Что произойдет при появлении электрического поля, т.е. когда проводник подключат к источнику.

Если в металле есть электрическое поле, то электрон получает дополнительную скорость, направленную против сил поля.

Пусть u - средняя скорость упорядоченного движения $\Rightarrow$

$$j = neu$$



Для металлов предельные токи таковы, что

$$j_{max} = 10\frac{A}{\text{мм}^2} = 10^7\frac{A}{\text{м}^2}$$

тогда

$$u = \frac{j}{ne} = \frac{10^7\frac{A}{\text{м}^2}}{10^{-29}\text{м}^{-3}\cdot 1,6\cdot 10^{-19}\text{Кл}} \approx 10^{-3}\text{м/с} << v_{\text{хаот}}$$

Таким образом скорость хаотичного движения много больше скорости упорядоченного движения, даже при самых максимальных токах.

Поэтому с точки зрения теории Друде-Лоренца ток в металле это медленный дрейф электронного облака сквозь кристаллическую решетку, в узлах которой находятся ионы, в направлении противоположенном внешнему электрическому полю.

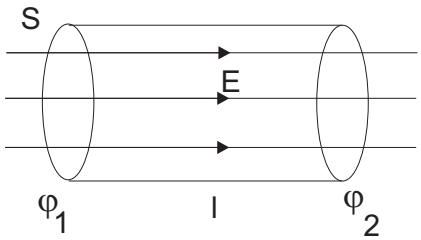
physics.spb.ru

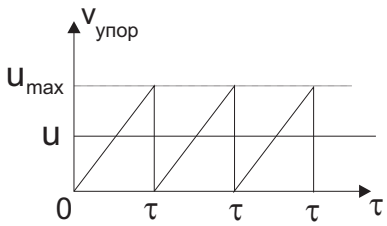
13.13.4 Вывод закона Ома из теории Друде-Лоренца.

Пользуясь положениями теории Друде-Лоренца, докажем, что сила тока возникающая в проводнике прямо пропорциональна разности потенциалов на концах проводника.

$$I = k\Delta\varphi$$

Введем следующие обозначения:
n - концентрация электронов проводимости;
e - заряд электрона;
$v_{\text{хаот}}$ - скорость хаотического движения электронов;
u - средняя скорость упорядоченного движения электронов;
λ - длина свободного пробега;
τ - время свободного пробега;
l - длина проводника;
S - площадь поперечного сечения проводника;
$\Delta\varphi$ - разность потенциалов на концах проводниках;
E - напряженность электрического поля внутри проводника;





$$E = \frac{\Delta\varphi}{l}; \qquad I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{neSl}{\Delta t} = neSu$$

$$F = eE = e\frac{\Delta\varphi}{l} = const$$

Учтем, что каждый раз при столкновении электронов с ионами, они полностью передают ионам свою кинетическую энергию:

$$u = \frac{u_{max}}{2} = \frac{a\tau}{2}; \qquad a = \frac{F}{m_e} = \frac{eE}{m_e} = \frac{e\Delta\varphi}{m_e l}; \qquad \tau = \frac{l}{v};$$

$$\Rightarrow \quad u = \frac{e\Delta\varphi}{2m_e l} \cdot \frac{l}{v}$$

$$\Rightarrow \quad I = \underbrace{\frac{ne^2\lambda}{2mv}\frac{S}{l}}_{k}\Delta\varphi$$

Границы применимости: n=const,t°=const,S,l,v=const

13.13.5 Сопротивление металлов.

$$R = \frac{2mv}{ne^2\lambda}\frac{l}{S} = \rho\frac{l}{S}$$

Вспомним, что из эксперимента следует $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ - линейная зависимость от температуры, из теории Друде-Лоренца следует корневая зависимость

$$\rho \sim \sqrt{T}$$

.

Теоретический вывод получен из того, что при нагревании проводника увеличивается скорость движения электронов, а все остальные характеристики остаются неизменными. В частности не меняется длина свободного пробега(расстояние между ионами). Еще одно видимое противоречие заключается в том, что и диэлектрики и проводники сходных свойств обладают примерно одинаковой теплоемкостью. Т.к. электронный газ должен включаться в рассмотрение теплоемкости металлов, очевидно хаотическое движение электронов не изменится с ростом температуры. Если обратится к теории теплоемкости твердых тел (закону Дюлонга и Пти), мы действительно не учитывали теплоемкость электронного газа и в области высоких температур получали соответствие теории с практикой.

С другой стороны теплопроводность металлов много больше теплоемкости диэлектриков, следовательно какая-то часть свободных электронов участвует в тепловом движении и осуществляет теплопередачу.

Все эти противоречия объясняет квантовая теория. Оказывается, только у небольшой части электронов при нагревании увеличивается скорость хаотического движения. Они участвуют в теплопередаче. Средняя же скорость хаотического движения практически не изменяется.

Как же объяснить рост сопротивления с ростом температуры? Сопротивление может зависеть только от длины свободного пробега. При низких температурах длина свободного пробега

стремится к бесконечности, т.е. электрон может пролететь без столкновении тысячи межатомных расстояний. С повышением температуры увеличивается скорость колебаний узлов кристаллической решетки, а следовательно, число соударений возрастает и растет сопротивление.

В сплавах различных металлов сопротивление меньше, т.к. при внедрении атомов другого в-ва межатомные расстояния увеличиваются и нарушается кристаллическая решетка.

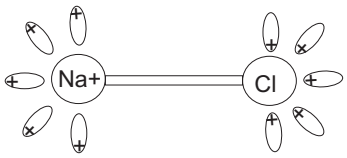
13.14 Электрический ток в электролитах.

Английский физик Майкл Фарадей заметил, что при пропускании тока через электролиты, на электродах выделяются чистые вещества.

Закон Фарадея является опытным законом и был открыт в 1834-36 годах. Стоит отметить, что при этом электролитическая диссоциация была открыта только в 1887 году.

13.14.1 Диссоциация NaCl.

Чистая вода является диэлектриком и не проводит электрический ток. Добавим в воду поваренную соль NaCl.



Кристаллическая решетка NaCl - ионная. Молекулы H_2O являются диполями. Диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon = 81$. При попадании в воду молекула NaCl распадается (происходит ослабление электрического взаимодействия) на ионы.

$$\mathrm{NaCl} \rightleftarrows \mathrm{Na}^+ + \mathrm{Cl}^-$$

Но при этом может идти и обратный процесс, т.е. рекомбинация.

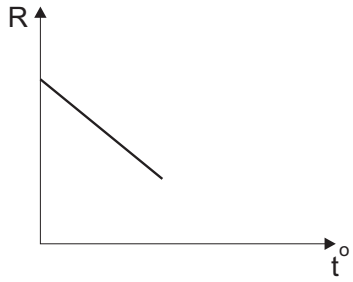
Через некоторое время число распавшихся молекул будет равно числу рекомбинировавших, т.е. число ионов перестанет меняться.

$$n = const$$

St. ➡ ***Носителями зарядов, при протекании ток в электролите, являются ионы.***

При увеличении температуры:

Количество распавшихся молекул увеличится, т.е. равновесие сместится и сопротивление электролита уменьшится.



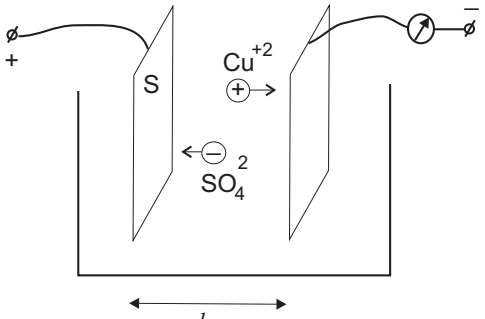
Ионы значительно тяжелее электронов, поэтому скорость их упорядоченного движения значительно меньше

$$u \approx 10^{-8} \div 10^{-7} \text{м}/c$$

$$R = f(\text{электролита}, n, S, l, t^\circ)$$

13.14.2 Диссоциация $CuSO_4$.

При пропускании тока через раствор медного купороса $CuSO_4$, происходит диссоциация на два вида ионов Cu^{+2} и SO_4^{-2}.



$$CuSO_4 \rightleftarrows Cu^{+2} + SO_4^{-2}$$

При этом под действием электрического поля, начинается встречное движение этих ионов Cu^{+2} к катоду и SO_4^{-2} к аноду. Достигнув этих анодов ионы отдают или захватывают электроны.

На катоде: $Cu^{+2} + 2e^- = Cu$

На аноде: $SSO_4^{-2} - 2e^- = SO_4$

Поскольку SO_4 не может находится в свободном состоянии, он вступает в реакцию с водой, находящейся в растворе медного купороса, с выделением кислорода.

Вторичная реакция:

$$2H_2O + 2SO_4 = 2H_2SO_4 + O_2 \uparrow$$

Выделяющийся кислород можно хорошо наблюдать в эксперименте, в виде пузырьков на аноде.

13.14.3 Закон Фарадея.

Каждый ион при своем движении переносит определенную массу и заряд. Этот заряд он передает электроду, оставляя ему лишние электроны или принимая недостающие.

Зная величину заряда, переданного электроду за некоторое время, можно рассчитать суммарную массу атомов, прибывших к этому электроду.

Для этого массу одного атома надо умножить на число ионов, перенесших заряд.

$$\boxed{m = \frac{M}{N_A} \cdot \boxed{q} ne}$$

Law ➡ ***Масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через электролит***

где n - валентность.

$$\boxed{\Rightarrow \quad m = kq = kI\Delta t, \qquad k = \frac{M}{N_a ne}}$$

к - электрохимический эквивалент.

Def. Электрохимический эквивалент это характеристика электролита которая показывает какая масса вещества, выделится на электроде при прохождении через электролит заряда в 1 Кл.

$$[k] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

Число Фарадея:

$$F = N_A e = 6 \cdot 10^{23}\text{моль}^{-1} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\text{Кл} = 96500\text{Кл/моль}$$

Def. Число Фарадея показывает, какой заряд необходимо пропустить через электролит, чтобы на электроде выделился 1 моль одновалентного вещества.

$$\boxed{m = \frac{Mq}{nF}}$$

Physics.spb.ru