

**7-9 классы, подготовка к теоретическому туру
олимпиады школьников «Робофест» по физике
Теоретический обзор к занятию 5 (13.02.2018).**

Тема: «ПОСТОЯННЫЙ ТОК. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА».

В первую очередь сформулируем основные определения величин, характеризующих **электрический ток** (направленное движение носителей заряда).

Проводники – вещества, содержащие *свободные* носители заряда (которые могут перемещаться по всему объему тела при приложении электрического поля) в достаточно большом количестве (их концентрация по порядку величины не меньше концентрации атомов). При помещении проводящего тела в электрическое поле свободные носители заряда приходят в движение – возникает электрический ток, который существует до тех пор, пока поле внутри проводника отлично от нуля. В изолированном теле носители заряда спустя некоторое время распределяются так, что создаваемое ими электрическое поле полностью компенсирует внешнее поле внутри проводника – полное поле станет равным нулю.

Полупроводники – вещества с низкой концентрацией свободных носителей заряда. У многих полупроводников концентрация носителей может резко возрастать при различных воздействиях (нагревании, освещении и т.д.)

Сила тока – заряд, протекающий через сечение проводника в единицу времени: $I = \frac{q}{t}$.

Источник тока, источник электродвижущей силы (ЭДС) – прибор, производящий разделение зарядов за счет работы *сторонних* сил. Характеризуется величиной ЭДС, равной отношению работы сторонних сил по перемещению через источник пробного заряда к величине этого

заряда: $E \equiv \frac{A_{стор}}{q}$. Она равна напряжению, которое создает источник на своих клеммах при

разомкнутой цепи (ток через источник не течет) $E = U_0$. Необходимость сторонних сил для поддержания тока связана с тем, что (как было отмечено выше) сами по себе носители заряда под действием электрических сил стремятся занять равновесное положение и остановиться. Поэтому нужны силы, не связанные с электрическим полем, которые будут «перетаскивать» заряд против действия электрических сил (положительные заряды к положительному полюсу источника, а отрицательные – к отрицательному). Другая важная характеристика источника – внутреннее сопротивление r . Оно описывает потери, происходящие в источнике (обычно в виде тепла, выделяющегося при протекании тока через источник). «Идеальный» источник без потерь характеризуется нулевым внутренним сопротивлением. У такого источника напряжение на клеммах всегда одинаково (равно ЭДС), независимо от тока. Реальный источник можно рассматривать как последовательное соединение идеального источника и резистора с сопротивлением r . Напряжение на клеммах реального источника при ненулевом токе $U = E - Ir$.

Теперь рассмотрим основные законы и их следствия:

Элементарная теория проводимости: Если на концах проводника создана разность потенциалов, то внутри его существует электрическое поле $E = \frac{U}{l}$. Значит, носители заряда (электроны) начнут двигаться с ускорением:

$$a = \frac{eE}{m} = \frac{e}{m} \cdot \frac{U}{l}.$$

Однако при ненулевой скорости они будут сталкиваться с препятствиями – дефектами атомной решетки металла, и отдавать им часть кинетической энергии – тем чаще, чем выше их скорость. Поэтому влияние решетки на движение электрона проводимости можно учесть, вводя пропорциональную скорости силу сопротивления $\vec{F}_{comp} = -\gamma \vec{v}$. В этом случае разгон электронов электрическим полем будет продолжаться до достижения ими «скорости дрейфа»

$\gamma v = eE \Rightarrow v = \frac{eU}{\gamma l} \equiv \alpha \frac{U}{l}$ (величина α называется **подвижностью** носителя заряда).

Поэтому установившийся в проводнике сечением S с плотностью электронов проводимости n ток равен $I = envS = e\alpha n \cdot \frac{S}{l} \cdot U \equiv \frac{U}{R}$. Итак, получился **закон Ома для участка цепи**:

напряжение на концах участка равно произведению силы тока на **сопротивление**:

$$U = IR, \quad R = \frac{1}{e\alpha n} \cdot \frac{l}{S} \equiv \rho \cdot \frac{l}{S}$$

(величина ρ (удельное сопротивление) является характеристикой вещества проводника; как видно из формулы, оно зависит от концентрации и подвижности носителей и величины их заряда).

Непрерывность тока: сумма сил токов, подтекающих к любой точке схемы постоянного тока, равна сумме сил токов, утекающих от нее: $\sum I_{in} = \sum I_{out}$ (эквивалентная формулировка: алгебраическая сумма токов, сходящихся в любой точке схемы, равна нулю).

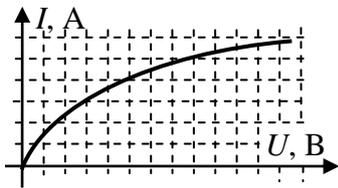
Закон Ома для участка цепи с ЭДС: при наличии источника ЭДС он, разделяя заряды, создает дополнительную разность потенциалов. Ток, вызываемый созданной им разностью потенциалов, будет стремиться уменьшить ее, поэтому напряжение на концах участка с ЭДС $U = E - I \cdot R$, где R – полное сопротивление этого участка (включая внутреннее сопротивление источника).

С этим законом связано правило Кирхгофа для контура, выделенного из цепи: сумма падений напряжения на любом замкнутом контуре в схеме равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре: $\sum I \cdot R = \sum E$. Отметим, что выбор знака величины в каждом случае связан с выбранным направлением тока в каждом звене контура: ток в этих соотношениях считается со знаком «+», если он течет по направлению обхода, и со знаком «-», если против. ЭДС также рассматривается как алгебраическая величина, то есть входит в соотношения со знаком «+», если полярность включения такова, что стекающий с положительного полюса ток идет по направлению обхода. Но при этом нет необходимости «угадывать» истинное направление тока в звене: достаточно записать уравнения для выбранных направлений, и найти из них токи как алгебраические величины. Отрицательность найденного значения будет означать, что реальный ток течет против выбранного направления.

Закон Джоуля-Ленца: при протекании тока в проводнике с сопротивлением происходит выделение тепла (как мы видели, сопротивление появляется из-за взаимодействия носителей заряда с препятствиями, и при этом взаимодействии носители отдают часть своей энергии атомам проводника). В установившемся режиме скорость носителей постоянна, то есть энергия, отданная ими проводнику, в точности возмещается за счет работы электростатических сил. Поэтому тепло, выделяющееся в проводнике, через который течет ток I под действием напряжения U , за время Δt , равно $\Delta Q = A = U \cdot \Delta q = UI \Delta t$. Итак, мощность тепловых потерь в проводнике $P = UI$. Для тех проводников, для которых справедлив закон Ома $I = \frac{U}{R}$, эту формулу можно представить еще в двух версиях:

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

Линейные и нелинейные элементы цепей: Элементы, для которых справедлив закон Ома, характеризуются линейной связью тока и напряжения. Поэтому их называют *линейными*. Однако есть элементы, у которых эта связь нелинейна. В этом случае эту связь нужно описывать. Обычно ее определяют с помощью задания *вольт-амперной характеристики* (ВАХ) нелинейного элемента, то есть функции $I = f(U)$, заданной уравнением или



графиком. Примерами нелинейных элементов являются лампы накаливания. Вместе с ростом приложенного к нити лампы напряжения растет выделяющееся в ней тепло, и в связи с этим растет ее равновесная температура, что в свою очередь, приводит к росту сопротивления нити. Поэтому ток растет медленнее напряжения.

Другой пример – диод (устройство с односторонней проводимостью).

При расчете цепей постоянного тока можно исходить из закона Ома, непрерывности тока или правил Кирхгофа. Однако в сложных схемах соответствующие уравнения часто бывают очень громоздкими. Поэтому очень важно находить удобные пути их записи и решения. Важнее всего правильный выбор неизвестных (желательно минимизировать число величин, через которые мы записываем все искомые величины), и учет симметрий схемы. Симметрия схемы позволяет найти ветви, в которых ток одинаков или найти точки схемы с одинаковым потенциалом. В первом случае учет симметрии позволяет понизить число неизвестных в уравнениях правил Кирхгофа. Во втором – позволяет упростить схему, так как точки с одинаковым потенциалом можно разъединять или соединять без изменения распределения токов и потенциалов в остальных частях схемы. Иногда симметрия позволяет догадаться, как распределяется по «симметричным» ветвям ток, подтекающий к узлу схемы. В очень многих случаях схемы можно упрощать, заменяя параллельное и последовательное соединения участков без ЭДС на один элемент. Законы параллельного и последовательного соединения:

	Общее сопротивление $R = R_1 + R_2$.
	Общее сопротивление $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

При изучении энергетического баланса цепей постоянного тока следует пользоваться законом Джоуля-Ленца. Эта тема достаточно популярна. Следует понимать, что формула мощности тепловых потерь $P = UI$ справедлива для любого элемента цепей постоянного

тока, а выражения $P = RI^2 = \frac{U^2}{R}$ с постоянной величиной сопротивления – только для

линейных элементов. Рассмотрим интересный вопрос, который нередко возникает в задачах: при каком сопротивлении нагрузки R , подключенной к аккумулятору с заданными ЭДС E и внутренним сопротивлением r , потребляемая нагрузкой мощность максимальна? Для получения ответа на этот вопрос удобно действовать так: потребляемая мощность $P = UI$, а напряжение на нагрузке равно напряжению на источнике, зависимость которого от тока в цепи дается формулой $U = E - rI$. Значит, $P = I(E - rI)$. График этой зависимости – парабола, максимум которой достигается в точке посередине между ее корнями, то есть при

$I = \frac{E}{2r}$. С другой стороны, ток в этом контуре $I = \frac{E}{R + r}$, и нужное значение силы тока достигается при $R = r$.