

10-11 классы, подготовка к теоретическому туру

олимпиады школьников «Робофест» по физике

Теоретический обзор к занятию 7 (10.02.2018).

Тема: «ПОСТОЯННЫЙ ТОК И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ».

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 распределятся 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: $I \equiv \frac{dq}{dt}$.

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:

$E \equiv \frac{A_{\text{стор}}}{q}$. 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).

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 $\vec{F}_{\text{сопр}} = -\gamma \vec{v}$. 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).

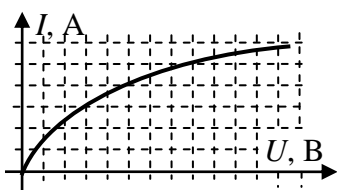
Закон Ома для участка цепи с ЭДС: при наличии источника ЭДС он, разделяя заряды, создает дополнительную разность потенциалов. Ток, вызываемый созданной им разностью потенциалов, будет стремиться уменьшить ее, поэтому напряжение на концах участка с ЭДС $U = E - I \cdot R$.

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.

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 $R = r$.

Обсудим отдельно описание работы электродвигателей. Как правило, ротор электродвигателя вращается под действием магнитных сил, и при последовательном описании важно учитывать электромагнитные явления, что сильно усложняют такое описание. Вместе с тем можно исходить из простого понимания, что магнитные силы, действующие на проводник с током, пропорциональны силе тока (закон Ампера). Если двигатель перемещает некоторое тело со скоростью v , то его полезная мощность (полезная работа, производимая за единицу времени) равна $P_{пол} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v$. Поскольку $F = \beta \cdot I$, где β – некоторый постоянный для данного двигателя коэффициент, зависящий от его конструкции, то $P_{пол} = \beta \cdot Iv$. Если двигатель работает от аккумулятора с ЭДС E , а полное сопротивление цепи обмотки равно R (сюда может входить и внутреннее сопротивление самого аккумулятора), то энергетический баланс электродвигателя описывается уравнением

$$E \cdot I = RI^2 + \beta \cdot Iv \Rightarrow I = \frac{E - \beta v}{R}$$

(работа аккумулятора по поддержанию тока идет на компенсацию тепловых потерь в цепи и на совершение полезной работы). Любопытно, что мы получили уравнение, согласно которому у двигателя под нагрузкой наблюдается «падение» ЭДС. На самом деле это связано с явлением *электромагнитной индукции*, которое выходит за рамки разбираемой темы. Вместе с тем нужно отметить, что полученное уравнение является основой для решения большинства задач, посвященных электродвигателям. Если к этому уравнению добавить уравнения механики, описывающие движение перемещаемого тела, мы получим систему уравнений, позволяющую полностью описать работу двигателя и движение тела.