

10-11 классы, подготовка к теоретическому туру

олимпиады школьников «Робофест» по физике

Теоретический обзор к вводному занятию 7.

Тема: «ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА».

Молекула любого вещества состоит из *электрически заряженных* частиц: это ядра атомов (тяжелые, заряжены положительно) и электроны (легкие, заряжены отрицательно). Поэтому структура молекул и все их «внутренние» свойства определяются именно взаимодействиями между этими частицами. Химические реакции, связанные с перестановками атомов в молекулах, образование кристаллических структур в твердых телах, образование всевозможных «конструкций» из молекул в жидкостях – все это связано именно с *электромагнитным взаимодействием* (так в физике называют взаимодействия зарядов). Особенно важную роль играет это взаимодействие в формировании свойств жидких и твердых веществ. При описании взаимодействия часто используют понятие «поля». Это материальная структура, являющаяся посредником во взаимодействии: каждый электрический заряд создает поле, которое действует на другие заряды. Таким образом, мы считаем, что именно поле создает *силу*, действующую на заряд и производит *работу* по перемещению зарядов.

Итак, *электростатическое поле* – понятие, введенное для удобства описания взаимодействий тел, обладающих особым свойством – *электрическим зарядом* (его величина характеризуется числом q , которое может принимать как положительные, так и отрицательные значения). На самом деле существует единое *электромагнитное поле*, которое и осуществляет передачу действия одного заряда на другое. Электромагнитное поле можно разделить по формальному признаку на две компоненты – *электрическую* (взаимодействует с покоящимися зарядами) и *магнитную* (взаимодействует с движущимися зарядами). Ясно, что это разделение зависит от выбора системы отсчета. Таким образом, электростатика – раздел теории электромагнитного поля, посвященный изучению полей покоящихся в выбранной системе отсчета зарядов. В задачах о постоянном токе мы считаем, что заряды перемещаются именно под действием электростатических полей. Для этих полей мы вводим две важные характеристики – силовую и энергетическую.

Напряженность электрического поля – силовая характеристика поля, равна отношению

силы, действующей на заряд, к величине этого заряда:
$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q}.$$

Разность потенциалов электрического поля (между точками 1 и 2) – отношение работы электрического поля по перемещению пробного заряда из точки 1 в точку 2 к величине этого

заряда:
$$\varphi_1 - \varphi_2 \equiv \frac{A_{12}}{q}.$$
 Если договориться о выборе «нулевой» точки, то можно ввести

потенциал поля в любой точке пространства, равный разности потенциалов между этой точкой и нулевой $\varphi(\vec{r}) = \varphi(\vec{r}) - \varphi(0)$. Возможность введения этой величины связана с тем, что электрические силы *потенциальны* – их работа не зависит от пути переноса. Соответственно можно ввести потенциальную энергию заряда в электрическом поле, разность значений которой в двух точках равна работе по перемещению заряда между ними. Нетрудно заметить, что $E_{ном}(\vec{r}) = q \cdot \varphi(\vec{r})$.

Очень важно, как ведут себя заряженные частицы в веществе. Тут возможны две ситуации. Большинство заряженных частиц «привязаны» к определенной молекуле, и поэтому они не могут перемещаться внутри вещества. Такие заряды так и называют – *связанными*. Однако некоторые частицы при образовании вещества становятся «общими» для многих молекул, и поэтому, переходя от молекулы к молекуле, могут перемещаться по всему объему вещества. Такие частицы называют «*свободными носителями заряда*». Свойства вещества сильно зависят от количества таких носителей, приходящихся на единицу объема вещества (то есть от их *концентрации*). В обычных условиях свободные носители заряда, как и все частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом «тепловом» движении, перемещаясь во всех

возможных направлениях одинаково. Тогда в **среднем** заряд в веществе никуда не перемещается. При создании же в веществе электрического поля на заряды действует сила, заставляя их двигаться **направленно**. Направленное движение носителей заряда называют «**электрический ток**». Ясно, что, чем выше концентрация свободных носителей заряда в веществе, тем легче создать в нем электрический ток. Поэтому все вещества подразделяют на классы по их способности пропускать (*проводить*) электрический ток.

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 разместятся так, что создаваемое ими электрическое поле полностью компенсирует внешнее поле внутри проводника – полное поле станет равным нулю. Поэтому для поддержания тока в проводнике необходим *источник тока* – устройство, «поставляющее» новые заряды и таким образом поддерживающее ненулевое поле.

Диэлектрики (изоляторы) – вещества, в которых все носители заряда *связаны* в нейтральных молекулах. При помещении во внешнее электрическое поле *поляризуются*, что приводит к ослаблению поля внутри диэлектриков, но поле остается ненулевым, а токи не возникают.

Полупроводники – вещества с низкой концентрацией свободных носителей заряда. При нормальных условиях плохо проводят ток. Однако у многих полупроводников концентрация носителей может резко возрасти при различных воздействиях (нагревании, освещении и т.д.), и тогда они становятся близки к проводникам по способности проводить ток. Полупроводники играют важную роль в создании всех современных электронных устройств.

Из элементов, способных создавать и поддерживать электрический ток, собирают **замкнутые электрические цепи**. Замкнутость необходима, чтобы при постоянном протекании тока заряд не накапливался в каких-либо местах, а перетекал непрерывно вдоль всей цепи с одного места на другое. Для описания электрических цепей важно знать о двух их основных характеристиках: это *сила тока* в цепи и *напряжение* на ее участках.

Сила тока – заряд, протекающий через сечение проводника в единицу времени. Она равна отношению заряда q , протекшего за интервал времени t , к величине этого интервала $I \equiv \frac{q}{t}$.

Единицей измерения силы тока в системе СИ является *ампер* (обозначение – А).

Напряжение – это понятие вводят в теории электрических цепей. Оно во многом синонимично понятию «разность потенциалов», так как тоже характеризует затраты энергии электростатического поля по перемещению зарядов через данный участок цепи: $U_{12} = \frac{A_{12}}{q}$.

Далее в этом занятии будем использовать термин «напряжение» и будем вместо слов «создание разности потенциалов между двумя точками цепи» говорить о «*приложении напряжения*» к участку цепи между этими точками. Единицей измерения напряжения в системе СИ является *вольт* (обозначение – В).

Разберем, как происходит движение зарядов в проводниках:

Элементарная теория проводимости: Если к концам проводника длиной l приложено напряжение U , то внутри него существует электрическое поле $E = \frac{U}{l}$. Значит, носители заряда (например, 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»

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

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). Единицей измерения сопротивления в системе СИ является ом (обозначение – Ом). Сопротивление проводника главным образом зависит от его материала, формы и размеров. На самом деле, у многих элементов цепей оказывается, что сопротивление зависит и от других факторов, которые могут изменяться при протекании тока, и тогда их сопротивление не является постоянной величиной, и закон Ома не будет работать. Элементы, для которых закон Ома выполняется, называют *линейными*, а те, для которых связь тока и напряжения более сложная, называют *нелинейными*. Более подробно о линейных и нелинейных элементах цепей рассказывается в основном курсе (занятие 7).

Пример 1: К клеммам, между которыми поддерживается разность потенциалов в 12 В, подключили отрезок провода длиной 4 м. По проводу потек ток с силой 3 А. Какой ток потечет по другому отрезку такого же провода длиной 6 м, если его подключить к тем же клеммам? Как мы видели, сопротивление линейно растет с ростом длины провода, поэтому ток будет (при одинаковом общем напряжении) убывать обратно пропорционально длине

$$\text{провода, то есть } I' = \frac{4\text{м}}{6\text{м}} I = 2 \text{ А}.$$

Пример 2: К клеммам, между которыми поддерживается разность потенциалов в 12 В, подключили отрезок провода сечением 2 мм². По проводу потек ток с силой 2 А. Какой ток потечет по отрезку провода такой же длины из того же материала, но с сечением 4 мм²? Здесь достаточно понять, что сопротивление однородного провода обратно пропорционально площади его сечения, поэтому полный ток будет прямо пропорционален сечению провода:

$$I' = \frac{4\text{мм}^2}{2\text{мм}^2} I = 4 \text{ А}.$$

В первую очередь нужно научиться рассчитывать линейные цепи постоянного тока – это цепи только из линейных элементов, по которым текут не изменяющиеся с течением времени токи. Все элементы таких цепей можно разделить на *источники*, *сопротивления (резисторы)* и *реостаты* (потенциометры).

Источник электродвижущей силы (ЭДС) – прибор, производящий разделение зарядов и таким образом поддерживающий ток в цепи. ЭДС – это «энергетическая» характеристика источника, равная отношению работы по перемещению через источник заряда к величине

$$\text{этого заряда: } E \equiv \frac{A}{q}. \quad \text{ЭДС равна напряжению на клеммах источника при разомкнутой цепи,}$$


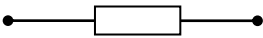
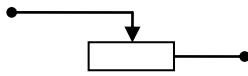
когда тока нет ($E = U_0$). У *идеального* источника напряжение остается равным ЭДС и при протекании тока, но в реальности оно обычно становится меньше, и для описания этого эффекта вводят еще одну характеристику – внутреннее сопротивление. То есть реальный источник рассматривается как последовательно соединенные идеальный источник и резистор с сопротивлением, равным внутреннему сопротивлению источника.

Резисторы (сопротивления) – линейные элементы электрических цепей, которые можно охарактеризовать постоянной величиной сопротивления.

Реостаты (потенциометры) – линейные элементы электрических цепей, сопротивление которых можно изменять внешним регулятором (например, изменением длины провода, по

которому протекает ток, передвижением «ползунка» - контакта, через который ток течет дальше).

Обозначение этих элементов на схемах цепей:

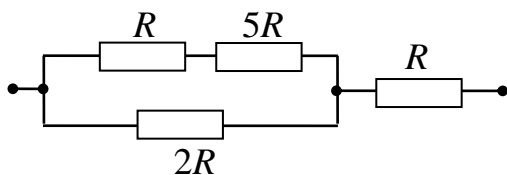
источник	резистор	реостат
		

Для измерения сил тока и напряжений в цепях используются приборы – *амперметры* и *вольтметры*. Амперметр включается в цепь последовательно с элементом, ток в котором измеряется, и для того, чтобы меньше влиять на ток в этом элементе, собственное сопротивление амперметра должно быть как можно меньше. Идеальный амперметр имеет нулевое сопротивление. Вольтметр подключается к точкам цепи, между которыми находится исследуемый элемент (такое подключение называют «параллельным»). Для того, чтобы ток через исследуемый элемент не изменялся, собственное сопротивление вольтметра должно быть как можно больше. Идеальный вольтметр имеет бесконечно большое сопротивление, и его подключение не изменяет распределение токов в цепи.

Основные законы, используемые при расчете линейных цепей постоянного тока:

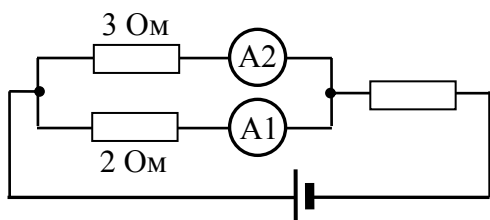
Правила расчета сопротивления при параллельном и последовательном соединении проводников: при параллельном соединении проводников с сопротивлениями R_1, R_2, \dots, R_N (то есть при подключении их всех к одной и той же паре контактов) напряжение на каждом из проводников одинаково $U_1 = U_2 = \dots = U_N$ (это разность потенциалов между этими контактами), общая сила тока равна сумме токов, протекающих через проводники $I = I_1 + I_2 + \dots + I_N$, а общее сопротивление удовлетворяет соотношению $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$; при последовательном соединении проводников с сопротивлениями R_1, R_2, \dots, R_N (при их подключении «друг за другом» между двумя контактами) сила тока во всех проводниках одинакова $I_1 = I_2 = \dots = I_N$, общее напряжение равно сумме напряжений на всех проводниках $U = U_1 + U_2 + \dots + U_N$, и общее сопротивление равно сумме сопротивлений $R = R_1 + R_2 + \dots + R_N$.

Пример 3: Найти общее сопротивление участка цепи, показанного на рисунке, если $R = 20$ Ом. Сопротивление «верхней» ветви параллельно соединенных участков $R + 5R = 6R$. Общее сопротивление параллельного соединения определяется из соотношения $\frac{1}{R_{||}} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{6R} = \frac{2}{3R}$,



то есть $R_{||} = \frac{3}{2}R$. Добавляя к нему еще одно сопротивление R , получаем, что общее сопротивление участка равно $\frac{5}{2}R$.

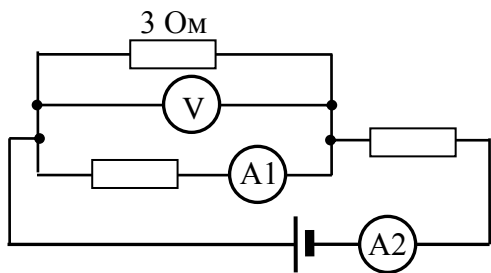
Пример 4: Один из двух идеальных амперметров (A1) в цепи, участок которой показан на рисунке, показывает силу тока 1,5 А. Определите показания второго амперметра (A2). Здесь



В двух ветвях токи обратно пропорциональны сопротивлениям (сопротивлениями амперметров мы пренебрегаем, так как они по условию идеальны), поэтому в ветви с сопротивлением в 3 Ом ток в 1,5 раза меньше, чем в ветви с сопротивлением 2 Ом. Таким образом, показания второго амперметра 1 А.

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).

Пример 5: В схеме, показанной на рисунке, идеальный вольтметр показывает напряжение 9 В, а идеальный амперметр А1 – силу тока 1,5 А. Найти показания идеального амперметра А2.



Ток в ветви с амперметром А1 нам известен, а ток через резистор 3 Ом можно определить по закону Ома: это $9 \text{ В} : 3 \text{ Ом} = 3 \text{ А}$. Эти токи, складываясь, образуют ток в ветви с амперметром А2, то есть его показания равны 4,5 А. Отметим, что мы можем также определить сопротивление резистора в ветви с

амперметром А1: это $9 \text{ В} : 1,5 \text{ А} = 6 \text{ Ом}$.

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 $U = \mathcal{E} - I \cdot R$.

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: $\sum I \cdot R = \sum \mathcal{E}$. 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 любой среде (и, соответственно, в любом элементе схемы), обладающей сопротивлением, носители заряда теряют энергию при взаимодействии с молекулами среды. Эта энергия выделяется в среде в виде тепла. При постоянном токе эти энергетические потери компенсируются работой электростатических сил, создающих движение заряда. Поэтому мощность «джоулевых» тепловых потерь на элементе схемы, в котором при приложенном напряжении U течет ток I равна:

$$P = \frac{U \cdot \Delta q}{\Delta t} = I \cdot U. \text{ Если известно сопротивление элемента, то можно использовать еще две}$$

$$\text{формулы для мощности: } P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}.$$

Пример 6: При подключении нагревательного элемента к идеальному источнику ЭДС он потребляет от этого источника мощность 36 Вт. К этому источнику подключили два таких нагревательных элемента, включенных последовательно. Какую мощность они теперь потребляют вместе? Тут необходимо заметить, что сопротивление двух последовательно соединенных элементов в два раза больше, чем у одного. Значит, сила тока через элементы будет в два раза меньше, и мощность, потребляемая одним элементом

$$P' = I'^2 \cdot R = \left(\frac{I}{2}\right)^2 \cdot R = \frac{1}{4} P \text{ (уменьшилась в 4 раза). Следовательно, мощность, потребляемая}$$

двумя элементами $2P' = \frac{1}{2} P$, то есть она в 2 раза меньше, чем потребляемая одним элементом, подключенным к такому же источнику.