

Прочитайте вступление к учебной лекции.

Если читали ранее – можно пропустить этот блок информации.

Учебная лекция в ДО – это учебный материал для конспектирования

Инструкция для работы с учебным материалом (для конспектирования):

1. Первый раз прочитайте всю лекцию, ничего не записывая.
2. Ответьте мысленно на вопрос, что главное в лекции, из скольких основных частей лекция состоит (*на сколько частей ее можно мысленно разбить*), придумайте название для каждой части – это будет план конспекта.
3. Откройте тетрадь для лекций и запишите в тетради тему, дату лекции и план конспекта.
4. Второй раз начинайте читать лекцию и приступайте к конспектированию: в соответствии с планом – в каждой части плана пишите определения величин, формулы законов, формулировки законов, делайте рисунки к разбираемым примерам или другому. Чем больше будет ваших записей, поясняющих о чем идет речь, тем лучше вы поймете и запомните учебный материал.

Внимание! Важно обращать внимание на то, что вы описываете – явление, закон, величину или другое понятие (например, модель объекта).

Руководствуйтесь правилами:

А) если описываете явление – запишите особенности рассматриваемого явления (*в чем заключается явление, каковы условия его возникновения, какие законы и величины используются для исследования явления*)

В) если описываете величину – запишите определение величины (*укажите физическая скалярная или векторная величина, формулу/ы для определения величины, единицу величины, поясните, что характеризует и, если векторная величина, то она как направлена*),

С) если описываете понятие (не величину) – запишите одно предложение, которое раскрывает смысл понятия (*для примера см. система отсчета, материальная точка, система материальных точек и др.*),

Д) если описываете закон – название, формулу, формулировку, физический смысл запишите закона. **Помните, что при записи формулы надо расшифровать названия величин, входящих в данную формулу.**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электрический ток. Характеристики и законы постоянного тока. Сопротивление и соединения сопротивлений. Работа и мощность тока.

Введение

Предыдущая лекция помогла разобраться с явлениями, наблюдаемыми в веществе при наведении на него электрического поля, это явления поляризации в диэлектрике и электростатической индукции в проводнике.

Еще одно применение электрических свойств вещества – это электрический ток. Способностью проводить электрический ток обладает проводник. Для описания *электрического тока* существуют две характеристики – сила тока и плотность тока. Для описания *способности проводника проводить электрический ток* существует одна характеристика – сопротивление, и производная от нее, обратная ей величина, которая называется проводимость. Сопротивление проводника рассматривается и как специальный элемент электрической цепи. Сопротивления – элементы электрической цепи, которые широко применяются в электрических схемах различного назначения.

Различают постоянный и переменный ток. В этой лекции изучим постоянный ток. Для исследования постоянного электрического тока используют три основных закона: *закон сохранения зарядов, законы Ома для разных случаев, закон Джоуля-Ленца*. А также используют *правила Кирхгофа*, полученные как следствие из двух первых законов.

Электрический ток

Электрический ток – физическое явление, заключающееся в движении электрических зарядов под действием электрического поля.

Обратите внимание, что движение электрических зарядов под действием электрического поля может происходить не только в проводнике, но и в газе, жидкости, вакууме. Если речь идет о токе в проводнике, то его иногда называют током проводимости.

Сила тока – физическая скалярная величина, которая количественно характеризует движение зарядов, она численно равна заряду, который проходит через рассматриваемое сечение за единицу времени. Математических формул для определения силы тока существует две:

$I = \frac{q}{\Delta t}$ – для постоянного тока, определяет силу тока за любой промежуток времени;

$I = \frac{dq}{dt}$ – для переменного тока, определяет силу тока в любой момент времени.

Единица измерения $[I] = 1 \text{ А}$. Она относится к основной единице СИ.

Плотность тока – физическая скалярная величина, которая характеризует движение зарядов через единицу площади поверхности за единицу времени, численно равна заряду, который проходит сквозь единицу площади поверхности за единицу времени, принимается, что поверхность расположена перпендикулярно направлению (скорости) движения зарядов:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad [j] = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

Плотность тока – важная характеристика электрического тока. От чего она зависит можно увидеть, если рассмотреть два случая движения зарядов – в воздухе и в проводнике.

Если речь идет о движении объемных зарядов (заряды в воздухе), то плотность тока зависит от объемной плотности зарядов и от скорости движения этих зарядов:

$$\vec{j} = \rho_+ \vec{V}_+ + \rho_- \vec{V}_-$$

ρ – объемная плотность зарядов,

V – скорость движения зарядов.

В воздухе возникают одновременно положительные и отрицательные объемные заряды и формула это учитывает с помощью индексов «+» и «-».

Если речь идет о проводнике, то плотность тока в проводнике зависит от количества зарядов N , проходящих через единицу площади поверхности

сечения проводника, от величины одного заряда (от заряда электрона) q и от средней скорости движения зарядов V :

$$\vec{j} = Nq\vec{V}, \quad (1)$$

V – скорость движения зарядов,

N – число зарядов в 1м^3 ,

q – заряд электрона.

Условия существования электрического тока – наличие зарядов и электрического поля, заставляющего эти заряды перемещаться. В этом случае заряды называют носителями тока.

Условия существования электрического тока в веществе – наличие в веществе свободных зарядов и электрического поля, заставляющего эти заряды перемещаться. То есть условие существования тока в веществе содержит два требования, необходимо, чтобы были

- а) свободные заряды;
- б) электрическое поле (которое заставляет заряды двигаться).

Что такое свободные заряды? Свободные заряды – это заряды, которые способны свободно перемещаться по всему объему вещества, такие заряды обнаруживаются в проводнике. Свободные заряды в проводнике – это электроны, которые способны перемещаться по всему объему проводника. Можно обнаружить свободные заряды в растворах – ионы, в ионизированном газе – ионы и электроны, в полупроводниках р- и n- типа – электроны и дырки.

Основные законы постоянного тока

Рассмотрим классическую электронную теорию проводимости и механизм возникновения электрического тока в проводнике.

Итак, электрический ток – это упорядоченное движение электрических зарядов. Классическая электронная теория электропроводности металлов представляет электроны проводимости в виде электронного газа, ограниченного размерами твердого тела (ТТ). Электрическое поле действует с силой на электроны, при этом действующая на один электрон сила равна:

$$\vec{F} = -e\vec{E}.$$

Запишем второй закон Ньютона для этой силы $\vec{F} = m\vec{a}$

и приравняем правые части этих двух уравнений $m\vec{a} = -e\vec{E}$. Из равенства получим ускорение электронов в проводнике:

$$a = -\frac{e}{m}\vec{E} \quad (2)$$

Назовем отношение $\frac{e}{m}$ – удельный заряд электрона, здесь заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а масса электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Если использовать формулу (1) для определения плотности тока, то с учетом того, что заряд электрона отрицательный, получим.

$$\vec{j} = -Ne\langle\vec{V}\rangle \quad (3)$$

Используем для определения скорости одно из уравнений кинематики, будем считать, что начальная скорость электрона равна нулю:

$$\langle\vec{V}\rangle = \frac{1}{2}\vec{a}\tau, \quad (4)$$

τ называют временем релаксации, это время движения электрона от одного до другого соударения с узлами кристаллической решетки (за счет чего и происходит разогрев проводника при движении электрического тока).

Подставим скорость (4) в уравнение для плотности тока (3):

$$\vec{j} = -Ne\frac{1}{2}\vec{a}\tau$$

Формулу для ускорения (2) подставим в последнее уравнение и получим:

$$\vec{j} = \frac{1}{2}N\frac{e^2}{m}\tau\vec{E}.$$

Мы получили очень интересную формулу, в ней произведение величин, стоящих перед напряженностью E , – определяет такую характеристику проводника, как удельная проводимость j , поэтому последнее уравнение можно переписать таким образом:

$$\boxed{\vec{j} = \gamma\vec{E}} \text{ – это закон Ома в дифференциальной форме} \quad (5).$$

Этот закон отражает зависимость плотности тока в исследуемой точке проводника от напряженности поля в этой точке и от электрических свойств проводника: **вектор плотности тока равен произведению удельной проводимости на напряженность поля в исследуемой точке проводника.**

Удельная проводимость γ – физическая скалярная величина, которая характеризует свойства проводника (металла) пропускать электрический ток. Она зависит от концентрации электронов, от структуры материала (отражается во времени релаксации τ), от величины и массы электрического заряда. Численно она равна:

$$\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m} \tau \right) (Ne)$$

Проводимость можно рассматривать как произведение плотности заряда (Ne) на подвижность зарядов $\left(\frac{e}{m} \tau \right) = \mu$.

Высокое значение проводимости в металле обусловлено высокой концентрацией электронов. В полупроводниках это значение гораздо меньше. Высокая проводимость в полупроводниках обусловлена высокой подвижностью (подвижность электронов в металле гораздо меньше, чем в полупроводниках).

Из (5) можно получить интегральную формулировку закона Ома, хорошо знакомую нам из школьного курса физики.

Удельное сопротивление – физическая скалярная величина, которая характеризует электрические свойства вещества, точнее характеризует способность проводника единичной длины и единичной площади сечения проводить электрический ток; она численно равна

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad [\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Здесь R – сопротивление проводника. Как правило, для определения сопротивления используют формулу, обратную предыдущей:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Эта формула отражает тот факт, что сопротивление зависит от электропроводности проводника, от длины и площади сечения проводника. Электропроводность проводника отражает *удельное сопротивление*, оно характеризует способность проводника единичной длины и единичной площади сечения проводить электрический ток.

Обратите внимание, электрические свойства проводника, электропроводность, электрическая проводимость – слова-синонимы.

Единица измерения сопротивления $[R] = 1 \text{ Ом}$.

Сопротивление зависит не только от электропроводности проводника, его длины и площади сечения, но и от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t).$$

Как видим, с ростом температуры сопротивление проводника линейно растет.

Электрическая проводимость (электропроводность) проводника характеризуется не только *сопротивлением* и *удельным сопротивлением*, часть используют величины, обратные им:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad - \text{удельная проводимость.}$$

$$G = \frac{1}{R} \quad - \text{проводимость.}$$

Выведем интегральную форму закона Ома с помощью всех рассмотренных выше формул, используя метод подстановок:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \qquad R = \rho \frac{dl}{dS}$$

$$\vec{j} = \frac{dl}{RdS} \vec{E} \qquad \rho = \frac{RdS}{dl}$$

$$\int \vec{j} R dS = \int \vec{E} d\vec{l}$$

$$R \int \vec{j} d\vec{S} = \int \vec{E} d\vec{l}, \quad \text{заменяем } \int \vec{j} d\vec{S} = I, \quad \int \vec{E} d\vec{l} = U,$$

получим $R \cdot I = U$ или

$$\boxed{I = \frac{U}{R}} \quad - \text{закон Ома в интегральной форме.}$$

Сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на этом участке проводника и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

Сопротивление проводника – это элемент электрической цепи. В электрической цепи бывает не одно сопротивление (нагрузка), а несколько сопротивлений, соединенных параллельно, последовательно или смешано.

При последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление цепи увеличивается:

$$R = R_1 + R_2 \text{ – для двух сопротивлений,}$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \text{ – для } n \text{ –го количества сопротивлений.}$$

При параллельном соединении сопротивлений общее сопротивление цепи уменьшается:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ или } R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \text{ – для двух сопротивлений.}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \text{ – для } n \text{ –го количества сопротивлений.}$$

Напряжение - физическая скалярная величина, которая характеризует электрическое поле в проводнике (в любом веществе или в вакууме), она численно равна линейному интегралу напряженности ЭП на рассматриваемом участке проводника L :

$$U = \int_L \vec{E} d\vec{l}$$

Напряжение – интегральная характеристика ЭП на рассматриваемом участке проводника.

ЭДС – физическая скалярная величина, которая характеризует напряжение источника электрической энергии, вырабатываемой устройством не электростатического происхождения, она численно равна

$$\varepsilon = \int \vec{E}_{\text{стор.}} d\vec{l}$$

$\vec{E}_{\text{стор.}}$ – напряженность поля сторонних сил, то есть сил неэлектростатического происхождения.

$$[\varepsilon] = 1\text{В}$$

Существенное отличие стационарного ЭП токов от электростатического поля зарядов в том, что для поддержания первого необходимо поддерживать напряжение в проводнике.

Рассмотрим напряжение, создаваемое на любом участке проводника:

$$U = \int \vec{E} d\vec{l}$$

Учтем, что на любом участке проводника существует поле зарядов и поле, создаваемое сторонними силами

$$\vec{E} = \vec{E}_{стор.} + \vec{E}_{квл.}$$

Тогда

$$U = \int (\vec{E}_{стор.} + \vec{E}_{квл.}) d\vec{l}$$

Можно представить интеграл суммы, как сумму интегралов

$$U = \int \vec{E}_{стор.} d\vec{l} + \int \vec{E}_{квл.} d\vec{l}$$

Заменим интегралы на те величины, которые они определяют

$$\int \vec{E}_{квл.} d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \varepsilon = \int \vec{E}_{стор.} d\vec{l},$$

и окончательно получим

$$U = \varepsilon + \varphi_1 - \varphi_2.$$

Это напряжение на участке проводника, который получил название *неоднородный участок электрической цепи*, т.е. участок, содержащий ЭДС.

Если $\varepsilon = 0$, то, очевидно, $U = \varphi_1 - \varphi_2$.

То есть, если ЭДС отсутствует, то напряжение численно равно разности потенциалов на концах этого участка, а закон Ома будет для этого случая будет таким:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad \varphi_1 - \text{потенциал 1-й точки, } \varphi_2 - \text{потенциал 2-й точки.}$$

Если эдс не равно нулю, то закон Ома для этого случая будет таким:

$$I = \frac{\varepsilon + \varphi_1 - \varphi_2}{R}$$

Для замкнутого контура закон Ома будет выглядеть следующим образом:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_0}$$

Существенное отличие двух полей (электрического поля токов и электрического поля неподвижных зарядов) можно представить и на языке энергий. Отличие ЭП токов от электростатического поля (неподвижных) зарядов в том, что для существования тока в проводнике ему необходимо поступление непрерывной энергии. При этом наблюдается еще одно явление: перенос зарядов по проводнику сопровождается работой сил поля, в свою очередь, работа сил поля по переносу зарядов приводит к выделению тепла в проводнике (если проводник неподвижен и если в нем не происходит химических реакций). Явление электрического тока сопровождается явлением выделения тепла в проводнике (проводник, по которому идет электрический ток, нагревается).

Совершаемая при переносе зарядов работа

$$A = q \int \vec{E} \cdot d\vec{l}, \quad A = A_{\text{стор.}} + A_{\text{кул}}, \quad A = q \int \vec{E}_{\text{стор.}} \cdot d\vec{l} + q \int \vec{E}_{\text{кул}} \cdot d\vec{l}, \quad \text{из них} \quad U = \frac{A}{q}$$

Можно заметить, что *напряжение* численно равно работе по переносу единичного положительного заряда на участке цепи. ЭДС численно равно работе сторонних сил по переносу единичного положительного заряда. *Разность потенциалов* численно равна работе кулоновских сил по переносу единичного положительного заряда:

$$U = \frac{A}{q} \quad \varepsilon = \frac{A_{\text{стор.}}}{q} \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{\text{кул}}}{q}$$

Работа сил электрического поля на участке проводника $A = qU$. Запишем определение силы тока (см. начало этой лекции) $I = \frac{q}{\Delta t}$, из этой формулы получим заряд $q = I\Delta t$, и подставим его в формулу для определения работы $A = qU$. Получим $A = IU\Delta t$. Учтем, что работа равна энергии электрического поля, преобразуемой в тепловую энергию $A = Q$ и получим закон Джоуля-Ленца:

теплота, выделяемая в проводнике при прохождении через проводник электрического тока равна произведению силы тока, напряжения и времени прохождения тока $Q = IU\Delta t$ – это интегральная форма закона Джоуля-Ленца.

С учетом закона Ома закон можно представить в таком виде $Q = I^2 R \Delta t$.

Дифференциальная форма закона Джоуля-Ленца характеризует энергию, выделяемую в одной точке проводника. Математическая формулировка его: объемная плотность энергии в единицу времени равна произведению удельной проводимости проводника на квадрат напряженности ЭП в данной точке проводника

$w = \gamma E^2 = \vec{j} \vec{E}$ – закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме.

Вся энергия, выделяемая в проводнике, непрерывно возмещается за счет других видов энергии не электрического происхождения: механической (динамомашина), химической (гальванические элементы, аккумуляторы), тепловой (термоэлементы), световой (фотоэлементы, солнечные батареи). Поскольку природа сил, обеспечивающих существование электрического тока в проводнике, не электрическая, то эти силы называли *сторонними силами*.

Потери энергии происходят и в ЭДС. Если этими потерями можно пренебречь, то источник электрической энергии называют идеальным и при расчете напряжения, подаваемого на внешнее сопротивление, учитывают, что это напряжение будет равно ЭДС:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varepsilon$$

Если этими потерями нельзя пренебречь, то источник электрической энергии называют реальным, в этом случае надо учитывать внутреннее сопротивление источника r при расчете напряжения, подаваемого на внешнее сопротивление, то есть напряжение будет меньше ЭДС на величину $I \cdot r$:

$$\varphi_1 - \varphi_3 = \varepsilon + I \cdot r$$

Для того, чтобы учесть потери энергии, появляющиеся за счет наличия внутреннего сопротивления ЭДС, вводится коэффициент полезного действия

η (КПД), который численно равен отношению полезной работы ЭДС ко всей затраченной:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{затрач}}}.$$

КПД – физическая величина, скалярная и безразмерная.

С учетом того, что работа связана с силой тока, напряжением и временем протекания тока по проводнику, можно последнюю формулу переписать таким образом

$$\eta = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{\varepsilon \cdot I \cdot \Delta t}$$

Заметим, что сила тока и время сокращаются, и получим, очень простую формулу для оценки КПД:

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon}.$$

Правила Кирхгофа

Электрическая ветвь - участок электрической цепи, который имеет одинаковое значение тока в каждой его точке (от одного до другого узла электрической цепи).

Контур – замкнутый путь в электрической цепи, проходящий по нескольким ветвям, причем каждая ветвь встречается один раз.

Правила Кирхгофа – это правила для расчета токов и напряжений в разветвленных электрических цепях с несколькими источниками энергии в разных ветвях цепи. Они не требуют преобразования цепи. Они – следствия основных закономерностей, наблюдаемых в электрической цепи.

1-е правило Кирхгофа: (отражает закон сохранения зарядов в узле): алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

$$\boxed{\sum I_i = 0}$$

2-е правило Кирхгофа: (следствие закона Ома для неоднородного участка цепи): алгебраическая сумма произведений сил тока на сопротивления, через которые эти токи проходят в контуре, равно алгебраической сумме ЭДС в этом контуре

$$\sum_{i=1}^N I_i R_i = \sum_{k=1}^M \mathcal{E}_k$$

Выводы:

1. Для существования электрического тока необходимо наличие носителей тока (электрических зарядов) и ЭП.
2. Характеристики тока – сила тока и плотность тока.
3. Свойства материалов проводить электрический ток характеризует проводимость, удельная проводимость, сопротивление, удельное сопротивление.
4. Электрическое поле в проводнике – это суперпозиция двух полей – сторонних и кулоновских сил. Напряжение – интегральная характеристика электрического поля в проводнике.
5. Для поддержания электрического тока всегда необходимо непрерывное поступление энергии в проводник, необходимо поддержания напряжения в проводнике.
6. Работа всех источников электрической энергии идет на выделение тепла в проводнике и на изменение потенциальной энергии тех элементов электрической цепи, которые способны ее запасать, например, это конденсаторы (закон сохранения энергии в электрической цепи).
7. Движение тока в проводнике сопровождается выделением тепла (закон Джоуля-Ленца).
8. Сила тока зависит от свойств материала и от напряженности ЭП в нем (закон Ома).
9. Электрический ток создает магнитное поле (об этом поговорим на след. лекции).