

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)
«РЕГИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ В Г. МИРНОМ»
«СВЕТЛИНСКИЙ ФИЛИАЛ ЭНЕРГЕТИКИ, НЕФТИ И ГАЗА»**

**Рассмотрено и рекомендовано
к использованию
на заседании МО
Протокол № 3 от
« 08 » ноября 2021 г.**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
по организации внеаудиторной самостоятельной работы студентов
по дисциплине
ОП. 01 «Электротехника и электроника»
программы подготовки специалистов среднего звена по специальности
среднего профессионального образования
21.02.01 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений**

**Составитель:
преподаватель общепрофессиональных дисциплин
Толмачева А.В.**

**Светлый
2021 год**

Содержательная часть методических материалов соответствует действующим учебным программам и рассчитаны на проведение занятий в форме самостоятельной работы обучающихся. Методические материалы для обучающихся служат источником учебной информации, а также содержат задания для самостоятельной работы по 10-ти вариантам исходных данных. Номер варианта назначается преподавателем.

Теоретический материал приведен в методических материалах и предназначен для изучения в аудитории, при этом указывается контрольное время, на которое должен рассчитывать обучаемый. При этом учащийся должен обращать повышенное внимание на выделенные **жирным** шрифтом или *курсивом* части текста. Особое внимание необходимо обращать на примеры и упражнения, так как приведенные решения помогут при выполнении практической части занятия.

Качество усвоения обучающийся проверяет самостоятельно, используя вопросы самоконтроля. Если обучающийся не может ответить на какой-либо вопрос, он должен вернуться к теоретической части данного занятия и найти верный ответ. Способность ответить на поставленные вопросы без использования какой-либо литературы свидетельствует об удовлетворительном усвоении учебной информации.

Домашние задания обучающийся должен выполнять во внеаудиторное время, но с учетом того, что к началу следующего аудиторного занятия они должны быть выполнены.

Все письменные задания должны оформляться последовательно, аккуратно, без грязных исправлений и зачеркиваний, разборчивым почерком, без применения сокращений слов (кроме общепринятых в литературе), допускается использование корректора (типа «Штрих»). Все иллюстрации, схемы, чертежи выполняются по линейке, простым карандашом с соблюдением требований ГОСТ и ЕСКД. Допускается при оформлении работ использование цветных карандашей (не допускаются фломастеры и маркеры), цветных шариковых ручек, но при этом не допускается применение красного цвета. На обложке тетради необходимо указать дисциплину, группу, Ф.И.О. (полностью). При выполнении работ указывается дата, очерчиваются поля для пометок преподавателя при проверке. В случае использования дополнительной литературы, ее список приводится в конце работы.

При оформлении решения задач требуется приводить условие задачи и исходные данные своего варианта. Решение задачи необходимо сопровождать комментариями и пояснениями.

Методические материалы содержат тестовую форму проверки знаний: входной контроль, промежуточный и итоговый. Тесты необходимо выполнять на отдельных листах с указанием группы, фамилии, инициалов, номера теста, номера варианта и сдавать в день их выполнения. При оформлении теста не требуется переписывать вопросы, необходимо указывать номер вопроса и рядом – номер выбранного ответа, который на Ваш взгляд является верным.

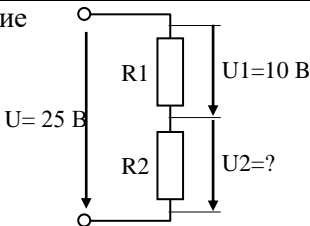
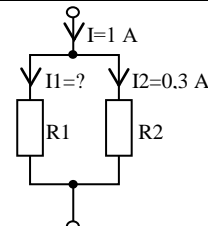
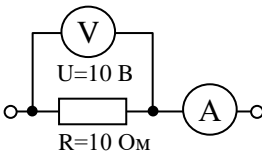
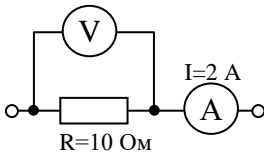
В ходе самостоятельной работы обучающиеся имеют возможность получить консультацию у преподавателя по интересующим вопросам. После окончания последнего занятия обучающиеся обязаны сдать рабочие тетради на проверку.

ЗАДАНИЕ 1.

Задание:

1. Выполнить тест входного контроля знаний (время – 10 мин.)
2. Изучить теоретический материал (время 35 мин.).
3. Ответить на вопросы самоконтроля (устно) (время 10 мин.).
4. Практическая часть: письменно выполнить 2 задания (время 35 мин).
5. Домашнее задание: письменно решить задачу (исходные данные выбрать в соответствии с вариантом, время 15 мин.).

Тест входного контроля

Тест 1а	Тест 1б
<p>1. Единицей измерения активной мощности является</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Герц 2) Ампер 3) Ом 4) Фарада 5) Ватт 	<p>1. Единицей измерения частоты переменного тока (напряжения) является</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Вольт 2) Фарада 3) Ом 4) Ампер 5) Герц
<p>2. Чему равно напряжение на R2?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 35 В 2) 250 В 3) 2,5 В 4) 15 В 5) 0,4 В 	<p>2. Чему равен ток, протекающий через R1?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 1,3 А 2) 0,7 А 3) 0,3 А 4) 1 А 5) 3,33 А 
<p>3. Какое значение тока показывает амперметр?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 20 А 2) 1 А 3) 100 А 4) 10 А 5) 0,5 А 	<p>3. Какое значение напряжения показывает вольтметр?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 2 В 2) 12 В 3) 0,2 В 4) 8 В 5) 20 В 
<p>4. Чему равно амплитудное значение переменного напряжения, мгновенное значение которого определяется выражением: $u(t) = 10 \sin 314t, В$</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 10 В 2) 314 В 3) 7,07 В 4) 31,4 В 5) 3,14 В 	<p>4. Чему равно амплитудное значение переменного тока, мгновенное значение которого определяется выражением: $i(t) = 100 \sin 314t, А$</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 70,7 А 2) 314 А 3) 100 А 4) 31,4 А 5) 3,14 А
<p>5. Чему равно действующее значение переменного напряжения, мгновенное значение которого определяется выражением: $u(t) = 10 \sin 314t, В$</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 10 В 2) 314 В 3) 7,07 В 4) 31,4 В 5) 3,14 В 	<p>5. Чему равно действующее значение переменного тока, мгновенное значение которого определяется выражением: $i(t) = 100 \sin 314t, А$</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 70,7 А 2) 314 А 3) 100 А 4) 31,4 А 5) 3,14 А

Теоретическая часть

Раздел 1. Электростатика

1.1. Общие сведения о строении вещества и физической природе электричества

Основные понятия. Всякое тело состоит из элементарных частиц, обладающих электрическими зарядами (электроны, протоны и др.) Одни из элементарных частиц входят в состав атомов и молекул вещества, другие – в свободном межатомном или межмолекулярном пространстве. В заряженном теле преобладают положительные или отрицательные заряды, в электрически нейтральном – тех и других зарядов одинаковое количество.

Движущиеся электрические заряды неразрывно связаны с окружающим их **электромагнитным полем**. Электромагнитное поле состоит из **электрического и магнитного полей**, которые выявляются по силовому действию на заряженные элементарные частицы.

Таким образом, под **электрическим зарядом** понимается свойство частиц вещества или тел, характеризующее их взаимосвязь с собственным электромагнитным полем и их взаимодействие с внешним электромагнитным полем. Так как электрический заряд – это свойство частиц вещества или тел, то он не мыслим в отрыве от материи, но при рассмотрении электромагнитных явлений часто коротко говорят «заряд», понимая, что речь идет о заряженных частицах или телах. Синонимом «заряда» при его количественном определении является термин «количество электричества».

Разноименно заряженные тела притягиваются друг к другу, одноименно заряженные – отталкиваются. Эти взаимодействия происходят посредством и в пространстве электрического поля под действием силы Кулона пропорциональной величине зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Обратите внимание, что поскольку электрическое поле оказывает силовое действие на внесенные в него частицы или электрически заряженные тела, то оно способно совершать работу. Следовательно, электрическое поле обладает энергией, которую называют электрической энергией.

Каждая точка электрического поля характеризуется **напряженностью** поля \mathcal{E} .

Напряженность электрического поля определяется отношением силы F , с которой поле действует на точечный пробный заряд Q , помещенный в данную точку поля, к этому заряду:

$$\mathcal{E} = F/Q. \quad (1.1)$$

Точечным зарядом называется заряженное тело, линейные размеры которого стремятся к нулю и заряд которого настолько мал, что не изменяет рассматриваемое внешнее поле.

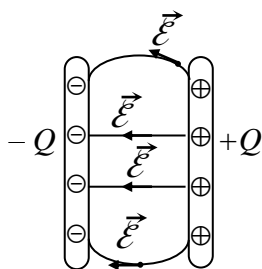


Рис. 1.1. Линии напряженности электрического поля

Таким образом, при рассмотрении **единичного заряда**, т.е. $Q = 1$ (один кулон), \mathcal{E} численно равно F , следовательно, напряженность электрического поля численно равна силе поля, действующей на единичный заряд.

Запомните, что напряженность электрического поля характеризуется не только значением, но и направлением, которое совпадает с направлением силы поля, действующей на положительный заряд, находящийся в данной точке. Следовательно, напряженность поля – **векторная величина**.

На рис. 1.1. показан вектор напряженности \mathcal{E} электрического поля между двумя параллельными пластинами с зарядами $+Q$ и $-Q$. Графически электрическое поле

изображается линиями напряженности электрического поля. Линия напряженности проводится так, чтобы в каждой воображаемой ее точке вектор напряженности поля был направлен вдоль касательной к ней в этой точке. Линия напряженности электрического поля всегда начинается на положительном заряде и оканчивается – на отрицательном, т.е. она является незамкнутой.

Электрическое напряжение. Потенциал. Если точечный положительный заряд $+Q$ переместился под действием силы F электрического поля из точки B в точку C на расстояние l , в направлении линий напряженности поля (рис.1.2), то работа совершена за счет потенциальной энергии поля и определяется:

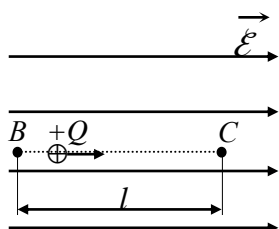


Рис. 1.2. Перемещение электрического заряда в электрическом поле

$$A = F \cdot l = \mathcal{E} \cdot Q \cdot l. \quad (1.2)$$

Величина, определяемая отношением работы по перемещению заряда Q между двумя точками поля к заряду, называется **электрическим напряжением** (или просто – **напряжением**) между указанными точками B и C .

Следовательно, напряжение определяется соотношением:

$$U = A/Q. \quad (1.3)$$

Таким образом, *напряжение между двумя точками численно равно работе сил поля при перемещении между этими точками положительного единичного заряда.*

В Международной системе единиц СИ для напряжения принята единица – **вольт (В)**.

Напряжение между данной точкой B электрического поля и другой точкой, потенциал которой условно принимается равным нулю, называется **потенциалом ϕ** данной точки поля. Потенциал земли считают равным нулю.

Потенциал, *численно равен работе, которая может быть совершена силами электрического поля при перемещении положительного единичного заряда из одной точки поля в точку, потенциал которой принят равным нулю.*

При перемещении единичного положительного заряда из точки B , имеющей потенциал ϕ_B , в точку C с потенциалом ϕ_C работа, производимая силами поля, т.е. напряжение между указанными точками, равна разности потенциалов:

$$U_{BC} = \phi_B - \phi_C, \quad (1.4)$$

т.е. *напряжение между двумя точками электрического поля равно разности потенциалов этих точек.* Потенциал измеряется в вольтах, так же, как и напряжение.

Электропроводность. Атомы химических элементов, входящих в состав любого вещества, состоят из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Атомы обычно электрически нейтральны, так как заряд положительного ядра равен сумме зарядов окружающих его электронов.

Если от нейтрального атома (или молекулы) отделяется электрон, то атом превращается в *положительный ион*. Отделившийся от атома электрон присоединяется к другому нейтральному атому, образуя *отрицательный ион*, или остается свободным. Такие свободные электроны называют **электронами проводимости**. Количество свободных электронов (электронов проводимости) в единице вещества называется **концентрацией носителей заряда**.

В веществе, помещенном в электрическом поле, под действием сил поля возникает направленное движение носителей зарядов (электронов проводимости или ионов), называемое **электрическим током**. Под **электропроводностью** вещества понимается его свойство создавать электрический ток под действием электрического поля.

Степень электропроводности оценивается **удельной электрической проводимостью** материала. Полезно знать, что электрическая проводимость зависит от концентрации носителей заряда. При высокой концентрации – проводимость вещества больше, чем при малой. Все вещества в зависимости от ряда физических факторов и в том

числе от электропроводности классифицируются на **проводники, диэлектрики и полупроводники.**

Проводники обладают высокой проводимостью, к ним относятся большинство металлов и их сплавы, уголь, электролиты (водные растворы солей, кислот, щелочей) и расплавы.

Диэлектрики, наоборот, обладают ничтожно малой проводимостью. К ним относятся газы, минеральные масла, лаки и большое число твердых неметаллических материалов.

Полупроводники обладают промежуточной проводимостью между проводниками и диэлектриками, их проводимость при повышении температуры приближается к проводимости проводников, а при понижении – диэлектриков. К ним относятся кремний, германий, селен, окислы металлов.

Для сравнения: при $T = 300 \text{ К}$ у проводников удельная электрическая проводимость имеет значения $10^4 - 10^6 \text{ См/см}$ (напомним, что 1 См/см есть проводимость 1 см^3 вещества), у диэлектриков – 10^{-10} См/см , а у полупроводников – в пределах от 10^{-10} до 10^4 См/см , т.е. они имеют очень широкий диапазон удельной проводимости, который зависит от количества примесей, от внешних воздействий – света, электрического поля, ионизирующего излучения и др.

Поляризация диэлектрика. При внесении диэлектрика в электрическое поле, под действием сил которого орбиты электронов смещаются в направлении, противоположном направлению силовых линий напряженности. Вследствие этого ядра атомов оказываются смещенными относительно центров электронных орбит (рис. 1.3, а, б).

Такой атом можно рассматривать как **электрический диполь**, т.е. как пару разноименных точечных зарядов $+Q$ и $-Q$ (рис. 1.3, в), находящихся на расстоянии l друг от друга, которое называют **плечом диполя**. Заряды, образующие диполи диэлектрика, называются **связанными**, а произведение заряда Q и плеча l – **электрическим моментом диполя**:

$$p = Q \cdot l. \quad (1.5)$$

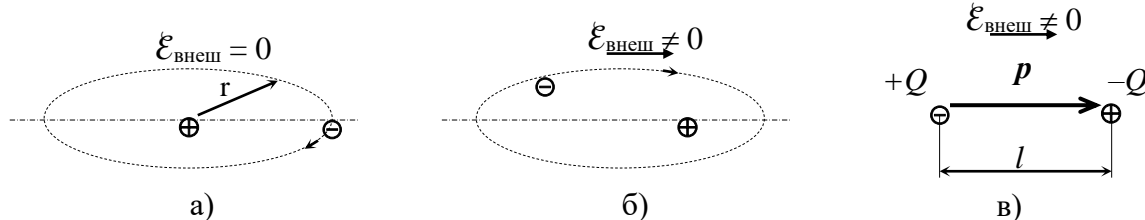


Рис. 1.3. Неполлярная молекула диэлектрика:

а) – при отсутствии внешнего поля; б) – при наличии внешнего поля; в) – эквивалентный диполь

Электрический момент – векторная величина, направленная от отрицательного заряда диполя к положительному. Таким образом, атомы во внешнем поле становятся диполями, электрические моменты p которых стремятся расположиться в направлении внешнего поля. При исчезновении поля исчезает и смещение электронных орбит. Явление смещения называется **поляризацией диэлектрика.**

Поляризованные атомы или молекулы создают свое электрическое поле, направленное противоположно основному, в результате происходит ослабление приложенного поля. Способность диэлектрика поляризоваться под действием электрического поля оценивается **диэлектрической проницаемостью ϵ** , которая показывает, во сколько раз ослабляется основное поле вследствие поляризации.

У диэлектрика, расположенного в периодически изменяющемся электрическом поле, смещение также будет периодическим, что влечет за собой его нагревание. Чем выше частота внешнего поля, тем сильнее нагревается диэлектрик. Это явление используется для сушки диэлектриков или получения химических реакций, требующих повышенной температуры. Мощность, расходуемая на нагрев диэлектрика, отнесенная к единице его объема, называется **удельными диэлектрическими потерями.**

Напряженность электрического поля, в котором расположен диэлектрик, можно повысить до такого значения, при котором **произойдет пробой диэлектрика**, т.е. его местное разрушение (разрушение кристаллической решетки материала). Эта напряженность поля называется **пробивной напряженностью** $\mathcal{E}_{ПР}$ или **электрической прочностью диэлектрика**, а напряжение при пробое – **пробивным напряжением** $U_{ПР}$.

Электрическая прочность диэлектрика зависит от ряда условий: рода напряжения, продолжительности действия электрического поля формы электрического поля (формы электродов), толщины диэлектрика, его температуры, влажности и др.

!!! Полезно запомнить, что для надежной работы электроустановки необходимо, чтобы все ее диэлектрики работали при напряженностях, не выше допустимых, которые должны быть в несколько раз меньше пробивных. Электрическая прочность некоторых диэлектриков приведена в табл. 1.

Таблица 1.

Параметры некоторых электроизоляционных материалов

№	Наименование диэлектрика	$\mathcal{E}_{ПР}$	ε	ρ
		10^3 кВ/м	–	Ом·м
1.	Бумага, пропитанная маслом	10 – 25	3,6	–
2.	Воздух	3	1	–
3.	Гетинакс	10 – 15	4 -7	$10^8 - 10^{10}$
4.	Миканит	15 – 40	5 – 6	$10^9 - 10^{11}$
5.	Поливинилхлорид	32,5	3,2	10^{12}
6.	Резина	15 - 20	3 – 6	$10^{11} - 10^{12}$
7.	Стекло	10 -15	6 – 10	10^{12}
8.	Слюда	50 – 100	5,4	$5 \cdot 10^{11}$
9.	Совол	15	5,3	$10^{11} - 10^{12}$
10.	Трансформаторное масло	5 - 18	2 – 2,5	$5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{13}$
11.	Фарфор	15 - 20	5,5	$10^{12} - 10^{13}$
12.	Электроизоляционный картон	8 - 12	3 - 5	$10^6 - 10^8$

Пример 1

Лист электрокартона толщиной 0,3 см ($3 \cdot 10^{-3}$ м) зажат между двумя плоскими электродами. Определить допускаемое и пробивное напряжения. Допускаемое напряжение должно быть в 3 раза меньше пробивного.

Решение.

По табл. 1 находим пробивную напряженность для электрокартона, выбрав среднее значение из заданного диапазона: $\mathcal{E}_{ПР} = 10 \cdot 10^3$ кВ/м.

Рассчитываем пробивное напряжение:

$$U_{ПР} = \mathcal{E}_{ПР} \cdot d = 10 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ кВ.}$$

Рассчитываем допустимое напряжение:

$$U_{ПР} = U_{ПР} / 3 = 30 / 3 = 10 \text{ кВ.}$$

Электроизоляционные материалы. Электроизоляционными называются материалы – диэлектрики, обладающие ничтожной электрической проводимостью.

Электроизоляционные материалы применяются для изоляции проводниковых элементов или частей электрических машин, аппаратов, приборов и т.д., находящихся под разными потенциалами.

К электроизоляционным материалам предъявляются весьма разнообразные требования, главные из которых: достаточная электрическая прочность (см. табл. 1.1); большие удельные объемные и поверхностные сопротивления; высокая стабильность электрических и механических параметров; малые диэлектрические потери. Электроизоляционные материалы можно классифицировать по различным признакам: по

агрегатному состоянию (газообразные, жидкие, твердые); по их химической природе (органические, неорганические); по их нагревостойкости (классы) и т.д.

Газообразные диэлектрики. Главным из газообразных диэлектриков является воздух. При нормальной температуре (+20°C) и нормальном давлении 0,13 МПа (760 мм. Рт. Ст.) электрическая прочность воздуха ($3 \cdot 10^2$ кВ/м) меньше, чем у большинства жидких и твердых диэлектриков. Поэтому иногда наблюдается пробой воздушного промежутка непосредственно у поверхности изолятора, который называется **поверхностным разрядом**.

Из других газов в качестве изоляции применяются водород, углекислый газ, азот и инертные газы: аргон, неон и др.

Жидкие диэлектрики. К жидким диэлектрикам относятся: минеральные масла, синтетические жидкости, смолы, лаки.

Минеральные масла являются продуктами перегонки нефти и представляют собой смеси жидких углеводородов. Они применяются в масляных трансформаторах, масляных выключателях, кабелях, конденсаторах.

В трансформаторах масло служит для изоляции токоведущих частей и для охлаждения путем конвекции, т.е. переноса тепла при циркуляции масла.

В масляных выключателях масло способствует гашению электрической дуги при разрыве цепи.

В кабелях и конденсаторах масло применяется для пропитки бумажной изоляции.

Масло должно иметь высокую электрическую прочность (10 – 20 МВ/м). Полезно знать, что она резко падает при наличии влаги, поэтому перед заливкой и периодически при эксплуатации масло должно высушиваться и очищаться (см. табл. 1.1).

Искусственный жидкий диэлектрик совол (см. табл. 1.1), представляющий собой смесь молекул дифенила разной степени хлорирования, применяется взамен минерального масла для пропитки и заполнения конденсаторов, при этом емкость конденсаторов повышается в 2 раза. При использовании совола в трансформаторах, его разбавляют трихлорбензолом и поскольку он негорюч, то трансформаторы становятся пожаробезопасными.

Смолы при низких температурах – это аморфные стеклообразные массы. При нагреве они размягчаются и становятся пластичными, а затем жидкими. Смолы негигроскопичны и не растворяются в воде, но растворяются в спирте и других растворителях. Смолы являются важнейшей составляющей многих лаков, компаундов, пластмасс, пленок.

Наибольшее значение имеют синтетические (полимерные) смолы, например, полиэтилен, поливинилхлорид (см. табл. 1). Пластмассы, изготовленные на их основе, применяются для изоляции проводов, кабелей, для их защитных покрытий, для изготовления лаков.

Лаки представляют собой растворы пленкообразующих веществ: смол, битумов, высыхающих растительных масел, эфиров целлюлозы. В процессе сушки происходит образование лаковой пленки. Лаки применяются для пропитки с целью защиты от влаги и химически активной среды, а также для склеивания листочков слюды между собой и бумаги с тканью.

Твердые диэлектрики. Твердые диэлектрики составляют наиболее многочисленную группу изоляционных материалов (см. табл. 1).

1. Волокнистые органические материалы: бумаги, картон, фибра, ткани – изготавливаются из волокон древесины, хлопка, капрона.

Они обладают гибкостью, достаточной механической прочностью и гигроскопичностью, для уменьшения которой применяется пропитка минеральным маслом или компаундом.

Бумага изготавливается из древесины. Промышленностью выпускается бумага кабельная, конденсаторная, намоточная для изготовления бакелитовых изделий, оклеечная для изоляции листов электротехнической стали и др.

Электроизоляционный картон изготавливается из целлюлозы и подвергается прессованию. Он широко используется для прокладок в электрических машинах, трансформаторах и других электротехнических изделиях.

Фибра изготавливается из пористой бумаги путем обработки ее хлористым цинком. Применяется для изготовления панелей, стоек, втулок и т.д.

Гетинакс представляет собой многослойный диэлектрик, состоящий из прессованной бумаги, пропитанной бакелитовым лаком.

2. Пластмассы – материалы, состоящие из двух составных частей – связующей и наполнителя. Связующей служат полимеры (синтетические смолы), а также жидкое стекло или цемент.

Пластмассы широко применяются в электротехнике в качестве изоляционных и конструкционных материалов.

3. Эластомерами называют материалы, обладающие свойствами эластичности, т.е. способностью удлиняться при растяжении и принимать прежние размеры при снятии нагрузки.

Каучук натуральный и синтетический обладает высокой эластичностью и малой проницаемостью для влаги и газов.

Резина – эластичный материал, получается путем введения в каучук серы и последующей вулканизации при повышенной температуре. При содержании серы 1 – 3 % получается мягкая эластичная резина, при содержании серы 25 – 50 % получается твердая резина – эбонит, неэластичный, но хорошо поддающийся обработке материал.

В последнее время резина успешно заменяется эластичными пластмассами, например поливинилхлоридом, полиэтиленом, более стойкими к воздействию щелочей, кислот, минеральных масел.

4. Стекло получается плавлением кремнезема (SiO_2) с окислами натрия, калия, кальция с последующим охлаждением. Специальные сорта стекла, например сталинит, имеют высокую прочность.

Стекло в электротехнике применяется для изготовления изоляторов, а также колб ламп накаливания.

Стекловолоконное и стеклопрядя применяются, например, в качестве изоляции проводов, предназначенных для работы при высокой температуре.

5. Электрофарфор изготавливается из каолина, огнеупорной глины, кварца, полевого шпата. Фарфоровые изделия покрываются глазурью для уменьшения гигроскопичности и обжигаются.

Фарфор имеет высокую механическую и электрическую прочность и нагревостойкость. Он широко применяется для изготовления низковольтных и высоковольтных изоляторов.

6. Слюда – это минерал кристаллической структуры, легко расщепляющийся на тонкие слои (листочки). Она обладает высокой нагревостойкостью, влагостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами (см. табл. 1.1).

Миканит – склеенные лаком или смолой листочки слюды – применяются для различных прокладок и для изготовления фасонных деталей путем формовки.

7. Парафин – продукт переработки нефти, не гигроскопичен, плавится при 55°C . Применяется для пропитки бумаги, картона, дерева с целью уменьшения их гигроскопичности.

Вопросы самоконтроля

1. Как выявляется наличие электрического поля в пространстве?
2. Что понимается под *электрическим зарядом*?
3. Какой заряд называется точечным?
4. Какой заряд называется единичным?
5. Что называется *напряженностью* электрического поля?

6. Как графически изображается электрическое поле?
7. Как принято направлять силовые линии напряженности электрического поля?
8. Чем определяется работа электрического поля по перемещению единичного заряда?
9. Что называется *электрическим напряжением*?
10. В каких единицах измеряются напряжение и разность потенциалов в системе СИ?
Почему эти параметры имеют одинаковые единицы измерения?
11. Какие электроны называются *электронами проводимости*?
12. Какое явление называется электрическим током?
13. Что понимается под электропроводностью вещества?
14. Почему электропроводность вещества зависит от концентрации свободных носителей заряда?
15. Охарактеризуйте электропроводность проводников, диэлектриков, полупроводников.
16. В чем заключается явление поляризации диэлектриков?
17. Какого типа диэлектрики используются в электротехнике?

Практическая часть

Задание 1. В соответствии с номером варианта письменно в рабочей тетради ответьте на поставленные вопросы.

Вариант 1.

- 1) Поясните физический смысл напряженности электрического поля.
- 2) Что называется электрическим диполем?

Вариант 2.

- 1) Поясните правила изображения силовых линий напряженности электрического поля.
- 2) Чем объясняются тепловые потери в диэлектрике при его поляризации в переменном электрическом поле?

Вариант 3.

- 1) Чем определяется работа электрического поля по перемещению единичного заряда?
- 2) Какая напряженность электрического поля называется пробивной для диэлектрического материала?

Вариант 4.

- 1) От чего зависит электропроводность материала?
- 2) Что называется электрической прочностью диэлектрика?

Вариант 5.

- 1) Поясните физический смысл электрического тока.
- 2) Охарактеризуйте явление поляризации диэлектрического материала в электрическом поле.

Вариант 6.

- 1) Почему электрическое напряжение и разность потенциалов имеют одинаковые единицы измерения?
- 2) Что понимается под электропроводностью вещества?

Вариант 7.

- 1) Какие электроны называются электронами проводимости?
- 2) Почему и как электропроводность вещества зависит от концентрации свободных носителей заряда?

Вариант 8.

- 1) Охарактеризуйте электропроводность проводников, диэлектриков, полупроводников.
- 2) Какое напряжение для диэлектрика называется пробивным? Какие явления при этом наблюдаются?

Вариант 9.

- 1) Какое явление называется тепловым пробоем диэлектрика?
- 2) Что называется электрическим моментом электрического диполя?

Вариант 10.

- 1) Поясните природу электрического тока.
- 2) Перечислите условия, от которых зависит электрическая прочность диэлектрика.

Задание 2 (для всех вариантов). Используя теоретические знания и собственный практический опыт профессиональной деятельности, заполните таблицу, позволяющую произвести сравнительный анализ различных изученных видов диэлектрических материалов.

Сравнительный анализ свойств диэлектриков

№	Диэлектрик	Достоинства	Область применения
	<i>Газообразные</i>		
1.			
...			
	<i>Жидкие</i>		
...			
...			
	<i>Твердые</i>		
...			
...			

Домашнее задание**Задача 1**

Определите значения допускаемого и пробивного напряжений для заданного вариантом вида диэлектрика (табл. вар. 1).

Таблица вариантов 1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип диэлектрика	Бумага	Воздух	Гетинакс	Поливинил-хлорид	Стекло	Слюда	Савол	Резина	Трансформаторное масло	Фарфор
Толщина слоя диэлектрика, см	0,01	1,5	0,35	0,6	0,4	0,15	0,4	0,2	2,5	0,7

ЗАДАНИЕ 2

Задание:

1. Изучить теоретический материал (время – 45 мин.).
2. Ответить на вопросы самоконтроля (устно) (время 10 мин.).
3. Практическая часть: письменно выполнить 3 задачи (время 35 мин.).
4. Домашнее задание: письменно решить 2 задачи (время 15 мин.).

Теоретическая часть

Раздел 2. Электрические цепи постоянного тока

2.1. Электрический ток с точки зрения электронной теории строения вещества

Электрический ток. Свободные электроны (электроны проводимости) в металлическом проводнике (*проводник первого рода*) при отсутствии внешнего электрического поля находятся в состоянии беспорядочного движения, и количество электричества, переносимого через любое поперечное сечение проводника, в среднем равно нулю.

При наличии в проводнике электрического поля, направленного вдоль провода, свободные электроны под действием сил этого поля приобретают направленное ускоренное движение. Это движение направлено противоположно силовым линиям напряженности поля. Ускоренное движение электронов происходит до тех пор, пока электрон не столкнется с ионом кристаллической решетки металла, после чего движение повторяется.

Явление движения заряженных частиц под действием электрического поля в проводнике называется **электрическим током**.

Проводники второго рода – **электролиты** представляют собой растворы кислот, солей и щелочей. Часть молекул электролита под действием растворителя распадается на положительные и отрицательные ионы, которые подобно электронам в металле перемещаются по объему проводника. Молекулы водорода и металлов образуют положительные ионы, а молекулы неметаллических остатков электролитов – отрицательные ионы.

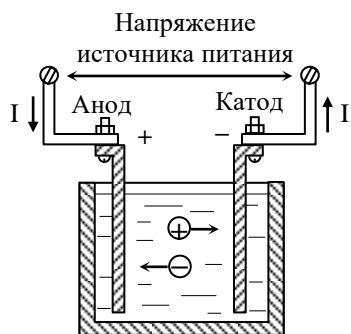


Рис. 2.1. Электрический ток в электролите

Если к электродам, погруженным в электролит (рис. 2.1), приложено напряжение, то под действием сил созданного электрического поля положительные ионы будут перемещаться к отрицательному электроду (катоде), а отрицательные ионы – к аноду. Это движение представляет собой электрический ток в электролите. Достигнув электродов, ионы или оседают на них, или вступают с ними в химическую реакцию. Отрицательные ионы электролита отдают аноду свои электроны, которые будут перемещаться дальше по цепи, замыкая ее. Положительные ионы электролита соединяются со свободными электронами катода, поступающими из цепи. Таким образом, в проводах, идущих от источника питания, возникает движение свободных

электронов в направлении к катоду.

Таким образом, прохождение тока в электролитах связано с перемещением ионизированных атомов вещества.

Ток не изменяющийся ни по времени, ни по направлению, называется **постоянным током** и обозначается прописной латинской буквой I .

Изменяющийся во времени по значению и по направлению ток называется **переменным током** и обозначается строчной буквой i . Единицей силы тока в системе СИ является **ампер (А)**.

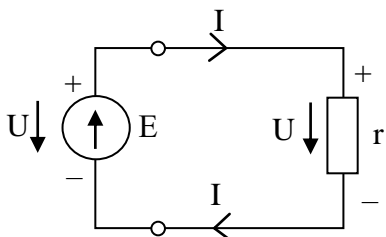


Рис. 2.2. Пример схемы электрической цепи

☑ Запомните, что условно за положительное направление тока принято направление противоположное движению электронов. Это означает, что движение электронов в проводнике происходит от положительного полюса источника к отрицательному (от низкого потенциала к высокому, от «минуса» к «плюсу»), а за положительное направление тока принято, наоборот – от «плюса» к «минусу». Это связано с тем, что явление электрического тока в физике было открыто раньше, чем электрон и его свойства.

Электрическая цепь и ее элементы. Совокупность устройств для получения, передачи и преобразования электрической энергии называется **электрической цепью**. Таким образом, электрическая цепь состоит из источников питания, приемников энергии (потребителей) и проводов для ее передачи.

На рис. 2.2. приведено изображение простейшей электрической цепи, т.е. ее электрическая схема. Она состоит из источника питания E , потребителя, изображенного в виде эквивалентного сопротивления нагрузки r и соединяющих их проводов.

В качестве источников питания применяются электрические генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую, аккумуляторы и первичные элементы, преобразующие химическую энергию в электрическую и др.

К приемникам электрической энергии относятся, например, электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую, электролитические ванны, преобразующие электрическую энергию в химическую, лампы накаливания и нагревательные устройства, преобразующие электрическую энергию в световую и тепловую и т.д.

В источнике питания происходит преобразование какого-либо вида энергии в электрическую, в результате чего каждый единичный заряд приобретает некоторое количество энергии. **Электродвижущей силой (эдс)** называется величина, численно равная энергии, получаемой внутри источника единичным электрическим зарядом. Обратите внимание, что при отключенной внешней цепи (нагрузки) эдс E равна напряжению между зажимами источника. Поэтому значение E имеет единицы измерения такие же, как и напряжение – вольт. Стрелка в условно-графическом обозначении E показывает, в каком направлении возрастает электродвижущая сила, придающая электронам направленное движение, т.е. ее направление совпадает с направлением движения электронов. За положительное направление напряжения, созданного источником E , принято направление от положительного полюса – к отрицательному, как изображено на рис. 2.2. Внимательно изучите распределение потенциалов на приведенной схеме (рис. 2.2) и положительные направления напряжений и тока в цепи.

В электроприемниках электрическая энергия преобразуется в тепловую, механическую или химическую. При этом напряжение U на зажимах приемника показывает, какая электрическая энергия преобразуется (расходуется) в нем каждым единичным зарядом.

Разность между эдс E и напряжением U представляет собой энергию, которая преобразуется в тепло (теряется) при перемещении единичного заряда в источнике питания и называется внутренним падением напряжения U_0 , следовательно:

$$E - U = U_0, \text{ или } E = U + U_0. \quad (2.1)$$

Напряжение от источника питания к потребителям передается по проводам. Потерей энергии в коротких проводах иногда пренебрегают, как это сделано в рассмотренном примере.

Кроме рассмотренных элементов в электрических схемах используются коммутационная аппаратура (рубильники, выключатели, контакторы); приборы защиты (плавкие предохранители, реле); измерительные приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры и др.).

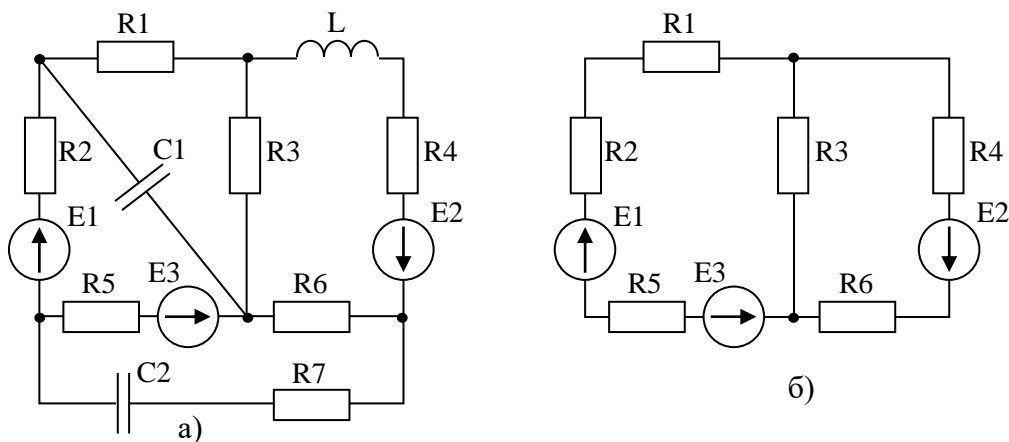


Рис. 2.3. Электрическая цепь и ее эквивалентная схема

Полезно запомнить, что цепи постоянного тока являются резистивными. Ветви цепей, содержащие конденсаторы исключаются, поскольку конденсатор для постоянного тока представляет собой разрыв цепи. Катушки индуктивности на постоянном токе представляют собой замкнутый накоротко проводник, т.е. катушки заменяются сопротивлением с $R = 0$. На рис. 2.3, а – приведен пример электрической цепи, содержащей конденсаторы и катушку индуктивности. На рис. 2.3, б – ее эквивалентная схема.

Закон Ома. Закон Ома является одним из основных законов электротехники, широко применяется для расчета электрических цепей. Полезно запомнить не только основное соотношение электрических параметров цепи, которое выражает этот закон, но и на его физический смысл.

Рассмотрим вывод основных соотношений для участка и для полной цепи.

Закон Ома для участка цепи.

Отношение силы тока I к площади поперечного сечения S провода, по которому он протекает, называется **плотностью тока**, и выражается соотношением:

$$\delta = I / S. \quad (2.2)$$

Следовательно, плотность тока в проводе определяется зарядом, проходящим через единицу поперечного сечения провода в секунду, который пропорционален скорости движения заряженных частиц вдоль провода. Единицей плотности тока в СИ является A/m^2 .

С другой стороны, скорость движения электронов пропорциональна силам поля, т.е. его напряженности. Таким образом, плотность тока можно выразить другим соотношением:

$$\delta = \gamma \cdot \mathcal{E} \quad (2.3)$$

Коэффициент пропорциональности γ называется **удельной электрической проводимостью**.

Учитывая соотношение, приведенное в Примере 1.1 $\mathcal{E} = U / \ell$, где расстояние перемещения заряда вдоль проводника, получаем:

$$\delta = \gamma \cdot U / \ell. \quad (2.4)$$

Приравняем формулы 2.2 и 2.3, выразим силу тока, получим:

$$I = U \cdot \gamma \cdot S / \ell = U / r, \quad (2.5)$$

где величина

$$r = \ell / (\gamma \cdot S) \quad (2.6)$$

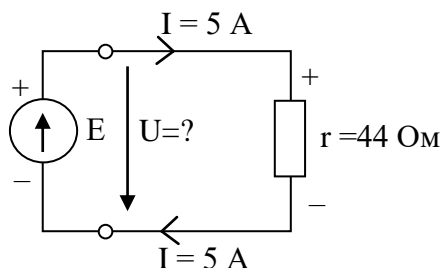
называется электрическим сопротивлением провода.

Таким образом, закон Ома для участка цепи выражается соотношением:

$$I = U / r$$

и показывает, что сила тока в проводе прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению провода.

☑ Запомните, что формула закона Ома выражает жесткое соотношение между тремя параметрами цепи – током, напряжением и сопротивлением. При этом оказывается, что ток пропорционален напряжению, а коэффициентом пропорциональности служит сопротивление.



Пример 2.1.

Лампа накаливания с сопротивлением $r = 440$ Ом включена в сеть с напряжением $U = 110$ В. Определить силу тока в лампе.

Решение.

По закону Ома определяем силу тока в лампе:

$$I = U / r = 110 / 440 = 0,25 \text{ А.}$$

Пример 2.2.

Определить напряжение на зажимах нагревательного прибора с сопротивлением $r = 44$ Ом, если сила тока в нем $I = 5$ А.

Решение.

Изобразим рассматриваемую цепь (приведена на рисунке). Напряжение на зажимах прибора определяем по закону Ома:

$$U = I \cdot r = 5 \cdot 44 = 220 \text{ В.}$$

Закон Ома для полной цепи.

В примере 2.2. закон Ома использовался для отдельно выбранного участка цепи – для ветви между зажимами. Закон Ома для полной цепи учитывает эдс источника питания и его внутреннее сопротивление. Иногда в задачах по электротехнике используются идеализированные источники эдс, у которых внутреннее сопротивление принимается равным нулю. Реальные источники обладают хотя небольшим, но вполне определенным значением сопротивления, которое обозначается r_0 (или $r_{вн}$).

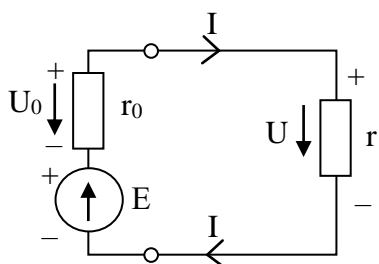


Рис. 2.4. Электрическая схема для закона Ома для полной цепи

Рассмотрим вывод закона Ома для полной цепи, используя цепь, приведенную на рис. 2.4.

Согласно формуле 1.6:

$$E = U + U_0 = I \cdot r + I \cdot r_0 = I \cdot (r + r_0), \quad (2.7)$$

откуда получаем выражение закона Ома для полной цепи:

$$I = E / (r + r_0) \quad (2.8)$$

Из формулы 2.7 следует, что при нагрузке в цепи напряжение на ней равно:

$$U = E - U_0 = E - I \cdot r_0. \quad (2.9)$$

Напряжение на зажимах этой же цепи при отключенной нагрузке, т.е. при токе $I = 0$, равно эдс источника:

$$U = E. \quad (2.10)$$

Электрическое сопротивление и проводимость. При электрическом токе, т.е. при направленном движении свободных электронов в проводнике, они, сталкиваясь с его

атомами в узлах кристаллической решетки испытывают противодействие своему движению, которое называется **сопротивлением проводника**.

Из закона Ома следует, что

$$r = U / I. \quad (2.11)$$

Единицей сопротивления в СИ служит **ом** (Ом):

$$1 \text{ В} / 1 \text{ А} = 1 \text{ В/А} = 1 \text{ Ом}.$$

Следовательно, сопротивлением 1 Ом обладает проводник, через который при напряжении 1 В протекает ток 1 А.

Величина, обратная электрическому сопротивлению называется **электрической проводимостью проводника**:

$$g = I / U. \quad (2.12)$$

Единицей проводимости является **сименс** (См):

$$1 \text{ См} = 1 / 1 \text{ Ом}.$$

В электротехнике для характеристики проводниковых материалов используется параметр **удельное сопротивление ρ** , имеющее единицы измерения **Ом/м**.

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется **удельной проводимостью** проводника (которая рассматривалась выше):

$$\gamma = 1 / \rho. \quad (2.13)$$

Удельная проводимость имеет единицы **См/м**.

Удельные сопротивления и проводимость для металлов, выражаемые в указанных единицах измерения на практике оказываются не очень удобными, поскольку не только длину, но и площадь сечения провода приходится выражать в метрах. Поэтому для удобства длину измеряют в метрах, а площадь сечения – в квадратных миллиметрах, но при этом изменяются и единицы измерения:

$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}; [\gamma] = \text{м} / (\text{Ом} \cdot \text{мм}^2),$$

причем $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Значения удельных сопротивлений ряда материалов при температуре 20°C приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры некоторых проводниковых электротехнических материалов

№	Наименование материала	Температура плавления, °С	Удельное эл. сопротивление при 20°C, мкОм·м = 10 ⁻⁶ Ом·м	Среднее значение температурного коэффициента сопротивления (от 0 до 100°C), °С ⁻¹
1.	Алюминий	657	0,029	0,004
2.	Бронза	900	0,21 – 0,04	0,004
3.	Вольфрам	3370	0,055	0,00464
4.	Константан	1200	0,4 – 0,51	0,000005
5.	Латунь	900	0,07 - 0,08	0,002
6.	Манганин	960	0,42	0,00006
7.	Медь	1083	0,0175	0,004
8.	Нихром	1360	1,1	0,00015
9.	Сталь	1400	0,13 – 0,25	0,006
10.	Фехраль	1450	1,2	0,00005

Устройства, предназначенные для включения в электрическую цепь с целью ограничения или регулирования тока в ней, называются резисторами (рис. 2.5). Они



Рис. 2.5. Условно-графическое изображение резистора

изготавливаются проволочными или непроволочными, с постоянным значением сопротивления или переменным (регулируемым). Термин «сопротивление» часто применяется для обозначения резистора. В проволочных резисторах проволока в виде спирали накладывается на основание из

керамики или другого изоляционного материала. Подвижный контакт позволяет изменять сопротивление. В непроволочных резисторах постоянного сопротивления токоведущая часть выполняется в виде стержня или в виде пленки, накладываемой на поверхность каркаса из изоляционного материала.

Зависимость сопротивления от температуры. При повышении температуры проводника увеличивается число столкновений свободных электронов с атомами кристаллической решетки. Следовательно, уменьшается подвижность, т.е. средняя скорость электронов, что соответствует увеличению сопротивления проводника.

С другой стороны, при повышении температуры возрастает концентрация электронов в единице объема проводника, что приводит к уменьшению сопротивления.

В зависимости от преобладания того или иного фактора при повышении температуры сопротивление или увеличивается (металлы), или уменьшается (уголь, электролиты), или остается почти неизменным (сплавы металлов, например манганин).

Для характеристики зависимости сопротивления материала от температуры используется температурный коэффициент сопротивления α , который показывает – во сколько раз изменилось сопротивление материала при изменении температуры на 1°C . Обратите внимание, что речь идет не о том *на* сколько изменяется сопротивление материала, а об относительном изменении, т.е. $\Delta r/r$.

Это относительное изменение выражается формулой:

$$\Delta r/r = \alpha(t_2 - t_1). \quad (2.14)$$

Отсюда можно определить сопротивление, которое приобретает материал при новой температуре t_2 :

$$r_2 = r_1 \cdot [1 + \alpha(t_2 - t_1)]. \quad (2.15)$$

Значения температурного коэффициента сопротивления для некоторых материалов приведены в табл. 2.

Пример 2.3.

Определить сопротивление проводов воздушной линии при температурах $+20$ и -10°C , если длина 400 м, сечение медных проводов составляет $S = 10 \text{ мм}^2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Решение.

Сопротивление проводов линии при температуре $+20^\circ\text{C}$

$$R = \rho \cdot \ell / S = 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 400 / 10 \cdot 10^{-6} = 1,4 \text{ Ом.}$$

Сопротивление тех же проводов при температуре -10°C

$$r_2 = r_1 \cdot [1 + \alpha(t_2 - t_1)] = 1,4 \cdot [1 + 0,004 \cdot (-30)] = 1,232 \text{ Ом.}$$

Пример 2.4.

Сопротивление медной обмотки электродвигателя при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ составляет $r_1 = 1,2$ Ом. После часовой работы ее сопротивление стало $r_2 = 1,4$ Ом. Определить температуру обмотки электродвигателя после часовой работы.

Решение.

Из формулы 2.14 выразим t_2 :

$$t_2 = [(r_2 - r_1) / (\alpha \cdot r_1)] + t_1 = [(1,4 - 1,2) / (0,004 \cdot 1,2)] + 20 \approx 62^\circ\text{C}.$$

Проводниковые материалы. Электротехнические проводниковые материалы делятся на две группы.

К *первой* группе относятся материалы с малым удельным сопротивлением. Основные требования: малый температурный коэффициент сопротивления, достаточная механическая прочность и устойчивость в отношении коррозии.

Медь широко применяется из-за малого удельного сопротивления (см. табл. 2.1), достаточной механической прочности, хорошей обрабатываемости и стойкости к коррозии. Она применяется в виде проволоки, проводов различного назначения, шин, полос. Электролитическая медь содержит не более $0,1$ % примесей.

Кроме чистой меди в электротехнике применяются ее сплавы с другими металлами (кадмий, бериллий, цинк) – бронзы, латунь.

Алюминий, несмотря на худшие электрические и механические свойства (см. табл. 2.1), получил очень широкое распространение. При замене медных проводов алюминиевыми с одинаковыми сопротивлениями и длиной сечение последних на 60 % больше, а масса на 52 % меньше медных.

Для линий электропередачи применяют алюминиевые провода с внутренними стальными проволоками (сталеалюминиевые).

Сталь вследствие большого удельного сопротивления применяется только для проводов линий небольшой мощности и линий связи.

Ко второй группе материалов с высоким удельным сопротивлением относятся сплавы: никель – хром – железо (**нихром**); железо – хром – алюминий (**фехраль**) и др. Из-за стойкости к высоким температурам они применяются для изготовления нагревательных элементов, реостатов и др.

Манганин – сплав 86 % меди, 12 % марганца и 2 % никеля. Малый температурный коэффициент сопротивления и большое удельное сопротивление манганина обеспечили применение его в измерительной технике (образцовые сопротивления и др.).

Электротехнический уголь в основном состоит из разновидностей углерода – графита и угля. Он применяется в щетках электрических машин, электродов, непроволочных резисторов.

Работа и мощность. В замкнутой электрической цепи (рис. 2.4) под действием эдс источника питания непрерывно происходит движение электрических зарядов.

Из определения эдс следует, что работа, затраченная внешними силами на перемещение заряда Q в источнике, или электрическая энергия, полученная за счет преобразования энергии другого вида:

$$A_{\text{И}} = W_{\text{И}} = E \cdot Q = E \cdot I \cdot t. \quad (2.15)$$

По закону сохранения энергии электрическая энергия, выработанная источником за время t , за то же время преобразуется в другие виды энергии на участках цепи.

Если напряжение на зажимах источника составляет U , то электрическая энергия, затраченная во внешней цепи, будет равна:

$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t. \quad (2.16)$$

Часть энергии затрачивается (теряется) внутри источника на его нагревание:

$$W_0 = W_{\text{И}} - W = (E - U) \cdot I \cdot t = U_0 \cdot I \cdot t.$$

Разность, приведенная в скобках, представляет собой внутреннее падение напряжения, т.е. на внутреннем сопротивлении источника:

$$U_0 = E - U. \quad (2.17)$$

Отношение работы A к времени t , в течение которого она выполнена, называется **мощностью**, т.е.

$$P = A / t. \quad (2.18)$$

Физический смысл мощности – это *скорость, с которой совершается работа, или скорость, с которой происходит преобразование энергии.*

Скорость, с которой механическая или другая энергия преобразуется в источнике питания в электрическую, называется **мощностью генератора** (источника):

$$P_{\text{И}} = E \cdot I \cdot t / t = E \cdot I. \quad (2.19)$$

Скорость, с которой электрическая энергия преобразуется во внешнем участке цепи в другие виды энергии, называется мощностью электроприемника:

$$P = U \cdot I \cdot t / t = U \cdot I. \quad (2.20)$$

Мощность, определяющая непроизводительный расход электрической энергии в генераторе, называется мощностью потерь:

$$P_0 = W_0 / t = U_0 \cdot I \cdot t / t = U_0 \cdot I. \quad (2.21)$$

По закону сохранения энергии мощность генератора равна сумме мощностей приемников и мощности потерь в генераторе:

$$P_{\text{и}} = P + P_0. \quad (2.22)$$

В системе СИ единицей мощности служит **ватт** (Вт), означающий мощность при которой в каждую секунду 1 Дж электрической энергии преобразуется в другой вид энергии, т.е.

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ с},$$

или

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Из 1.25 следует, что

$$[P] = [U \cdot I] = \text{В} \cdot \text{А},$$

т.е. ватт – это мощность при силе тока $I \text{ А}$ и напряжении $U \text{ В}$.

Пример 2.5.

Электродвигатель, потребляющий мощность 10 кВт, подключен к сети с напряжением 225 В. Определить силу ток электродвигателя.

Решение.

$$\text{Мощность } P = U \cdot I,$$

откуда ток

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10000}{225} = 44,4 \text{ А}.$$

Пример 2.6.

В цепи питания нагревательного прибора, включенного под напряжение 220 В, сила тока составляет 5 А. Определить мощность прибора и стоимость энергии, израсходованной прибором за 4 ч работы. Стоимость 1 кВт·ч электрической энергии равна 1 руб. 20 коп.

Решение.

Мощность прибора

$$P = U \cdot I = 220 \cdot 5 = 1100 \text{ Вт} = 1,1 \text{ кВт}.$$

Электрическая энергия, израсходованная прибором,

$$W = P \cdot t = 1100 \cdot 4 = 4400 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 4,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

а ее стоимость составит

$$1,2 \cdot 4 = 4,8 \text{ руб}.$$

Преобразование электрической энергии в тепловую. При прохождении тока в проводнике с сопротивлением r происходит столкновение электронов с ионами (ионов – с молекулами) вещества. При этом кинетическая энергия движущихся частиц передается ионам и молекулам, что и приводит к нагреванию проводника.

Скорость рассмотренного преобразования электрической энергии в тепловую характеризуется мощностью

$$P = U \cdot I$$

Имея в виду, что $U = I \cdot r$, получаем

$$P = I^2 \cdot r$$

или

$$P = U^2 / r$$

(2.23)

Количество электрической энергии, переходящей в тепловую за время t ?

$$W = P \cdot t = I^2 \cdot r \cdot t.$$

Так как в системе СИ единицей энергии является джоуль, то выделенной током в сопротивлении r тепло

$$Q = I^2 \cdot r \cdot t$$

(2.24)

Полученная зависимость была установлена опытным путем в 1844 г. Русским академиком Э.Х. Ленцем и одновременно английским ученым Джоулем и называется законом Джоуля – Ленца: *количество тепла, выделенное током в проводнике, пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.*

Преобразование электрической энергии в тепловую в различных нагревательных приборах имеет полезное значение. В электрических машинах и аппаратах такое преобразование является непроизводительным расходом энергии, снижающими их кпд. Тепло, вызывая нагрев этих устройств, ограничивает их нагрузку; при перегрузке повышение температуры может вызвать повреждение изоляции или сокращение срока службы установки.

Пример 2.7.

Определить количество тепла, выделенного в приборе в течение 1 ч. При сопротивлении прибора $r = 88$ Ом и напряжении на его зажимах $U = 220$ В.

Решение.

Сила тока

$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{88} = 2,5 \text{ А}.$$

Количество тепла, выделенного в приборе,

$$Q = I^2 \cdot r \cdot t = 2,5^2 \cdot 88 \cdot 1 \cdot 3600 = 1\,980\,000 \text{ Дж} = 1,98 \text{ МДж}.$$

Электрическая нагрузка проводов и защита их от перегрузок. В начале нагревания провода током вследствие равенства температур провода и окружающей среды тепло, выделенное током, идет на нагревание провода и температура его быстро повышается. С ростом температуры провода увеличивается отдача им тепла в окружающую среду, обусловленная возрастающей разностью температур провода и среды. Следовательно, рост температуры провода замедляется. Наконец, при некоторой температуре провода, называемой **установившейся**, наступает равновесие между теплом, выделяемым током и теплом, отдаваемым в окружающую среду. Время нагревания до установившейся температуры неодинаково для различных устройств: нить лампы накаливания достигает этой температуры за доли секунды, электрическая машина – за несколько часов.

Нагрев проводов допускается до определенных температур ($65 - 80^\circ\text{C}$), определяемых свойствами изоляции или свойствами самих проводов. Ток, при котором достигается установившаяся наибольшая допустимая температура, называется допустимым током провода (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Допустимые нагрузки для изолированных проводов

Поперечное сечение провода, мм ²	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
Допустимый ток, А	<u>11</u> -	<u>15</u> -	<u>17</u> -	<u>23</u> -	<u>30</u> 24	<u>41</u> 32	<u>50</u> 39	<u>80</u> 55	<u>100</u> 80	<u>140</u> 105	<u>170</u> 130	<u>215</u> 165

Примечание. Числитель – нагрузки для медных проводов, знаменатель – для алюминиевых проводов.

Определение сечения проводов по допустимому их нагреву производится по данной таблице, в которой для стандартных сечений изолированных проводов даются предельные длительно допустимые токи I_d . Провод выбирается такого сечения, чтобы допустимый ток был равен или несколько больше заданного или *расчетного тока*:

$$I_d \geq I_r.$$

Коротким замыканием называется соединение двух проводов разного потенциала через ничтожно малое сопротивление. **Ток короткого замыкания**, в десятки раз

превышающий номинальный ток установки, может вызвать механические или тепловые повреждения отдельных ее частей.

Участки электрической цепи защищаются от токов перегрузки и короткого замыкания плавкими предохранителями или реле. Плавкая вставка предохранителя содержит отрезок проволоки, которая при определенном токе перегрузки плавится и тем самым разрывает цепь тока.

Потеря напряжения в проводах. При передаче электрической энергии по коротким проводам их сопротивлением можно пренебречь. При большой их протяженности ($\ell > 10$ м) сопротивление проводов пренебрегать нельзя, так как электрический ток вызовет в них заметное падение напряжения:

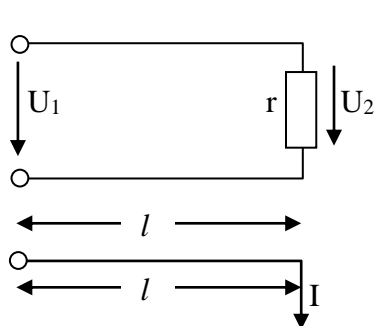


Рис. 2.5. Двухпроводная линия с нагрузкой на конце

$$\Delta U = I \cdot r = I \cdot \frac{2 \cdot \ell}{\gamma \cdot S}. \quad (2.25)$$

Разность напряжений в начале и конце линии (рис. 2.5) $U_1 - U_2$, равная падению напряжения на сопротивлении проводов, называется потерей напряжения:

$$U_1 - U_2 = \Delta U = I \cdot r. \quad (2.26)$$

При неизменном напряжении в начале линии напряжение в конце линии, т.е. на приемнике, изменяется от $U_2' = U_1$ при $I = 0$ до $U_2'' = U_1 - \Delta U$ при нагрузке.

Колебание напряжения для осветительной нагрузки не должно превышать $-2,5, +5\%$, а для силовой ± 5 и иногда $+10\%$ номинального. Поэтому допускаемая потеря напряжения в линии не должна превышать тех же значений.

Полезно знать, что при заданной допустимой потере напряжения, используя формулу 2.25, можно определить необходимое сечение проводов линии:

$$S = \frac{2 \cdot I \cdot \ell}{\gamma \cdot \Delta U}. \quad (2.27)$$

Найденное таким путем сечение, округленное до ближайшего большего стандартного значения, должно быть проверено на допустимое нагревание проводов по табл. 2.1

Мощность потерь в линии определяется произведением потери напряжения и тока, т.е.

$$\Delta P = I \cdot \Delta U = I^2 \cdot r.$$

Коэффициент полезного действия линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1}$$

с увеличением нагрузки уменьшается.

При потерях напряжения $2 - 5\%$ кпд линии составляет $98 - 95\%$.

Вопросы самоконтроля

1. Поясните физику электрического тока в проводниках первого и второго рода.
2. Какие обозначения используются для постоянного и переменного токов?
3. Укажите единицы измерения мощности, энергии в СИ.
4. Сто называется электрической цепью?
5. Приведите примеры источников и потребителей электроэнергии.
6. Почему цепи постоянного тока являются чисто резистивными?
7. Поясните физический смысл сопротивления материала, проводимости, удельного сопротивления, удельной проводимости. В каких единицах измеряются эти параметры?
8. Приведите закон Ома для участка цепи и для полной цепи.

9. Как зависит сопротивление проводников от температуры? Объясните данное явление с физической точки зрения.
10. Какие проводниковые материалы относятся к первой группе, какие – ко второй?
11. Приведите основные соотношения для определения мощностей источника энергии, потребителя, потерь.
12. Каков физический смысл электрической мощности для источника и для потребителя?
13. Какая температура для проводника называется установившейся?
14. С какой целью оценивают нагрев проводов и потери напряжения?

Практическая часть

Задача 2

К генератору постоянного тока с заданным значение E подсоединен потребитель. Ток в цепи составляет значение I . Определить напряжение генератора, сопротивление потребителя энергии и падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора r_0 . Исходные данные приведены в таблице вариантов 2. На сколько изменится ток в цепи, если сопротивление нагрузки увеличится в 2,5 раза?

Таблица вариантов 2

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E, В$	115	110	121	120	135	125	100	112	105	111
$I, А$	10	15	12	5	5	2	10	8	3	10
$r_0, Ом$	0,5	1,4	0,7	0,9	1,2	0,3	0,8	0,1	1,2	1,3

Примечание. При оформлении задачи приведите исходные данные своего варианта, изобразите электрическую схему, все этапы решения задачи сопровождайте пояснениями.

Задача 3

Определите сопротивление алюминиевого провода при температурах t_1 и t_2 при их длине l и сечении S . Исходные данные приведены в таблице вариантов 3.

Таблица вариантов 3

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, °С$	+21	+25	+23	+22	+24	+21	+25	+23	+22	+24
$t_2, °С$	-48	-49	-34	-39	-45	-42	-41	-43	-40	-44
$l, м$	110	100	115	112	118	200	250	248	235	220
$S, мм^2$	10	06	25	35	50	4	6	2,5	1,5	1,0

Задача 4

Электродвигатель, потребляющий мощность P , подключен к сети и через него протекает ток I . Определить напряжение сети. Исходные данные приведены в таблице вариантов 4.

Таблица вариантов 4

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P, кВт$	15	12	20	23	25	24	29	19	17	19
$I, А$	30	20	25	35	15	10	40	45	30	25

Домашнее задание

Задача 5

Для цепи, приведенной на рис. 2.4 произвести расчет заданных параметров, используя таблицу вариантов исходных данных 5.

Таблица вариантов 5

№ вар.	Дано										Определить
	$E, В$	$U, В$	$U_0, В$	$r, Ом$	$r_0, Ом$	$I, А$	$R_{и}, Вт$	$P, Вт$	$P_0, Вт$	η	
1	5			20							U, P, η

2		12			1	2					Е, r, P _И
3	10					0,2		1,6			r, P ₀ , η
4				48	2		4,5				Е, U, η
5	8			6				6			U, r ₀ , P _И
6		100			1,5	4					Е, P ₀ , η
7			0,15	49		0,15					Е, U, P _И
8	10	8		10					1		r ₀ , P, I
9	20				0,4					0,9	P _И , P, P ₀
10		30			1			60			r, E, η

Задача 6

На концах медной линии длиной l и сечения S потери напряжения составляют от U_1 до U_2 . Определите ток в линии, оцените с помощью табл. 2.2 возможность перегрузки при заданном сечении и вычислите мощность потерь в линии. Исходные данные приведены в табл. 6.

Таблица вариантов 6

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l, м$	110	100	115	112	118	200	250	248	235	220
$S, мм^2$	10	06	25	35	50	4	6	2,5	1,5	1,0
$U_1, В$	115	125	123	122	112	135	132	114	118	121
$U_2, В$	110	122	98	100	99	132	126	102	112	118

ЗАДАНИЕ 3

Задание:

1. Изучить теоретический материал (время – 55 мин.).
2. Ответить на вопросы самоконтроля (устно) (время 10 мин.).
3. Практическая часть: письменно решить 1 задачу (время 25 мин.).
4. Домашнее задание: письменно решить 1 задачу (время 15 мин.).

Теоретическая часть

2.2. Соединения проводников. Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа. Точка электрического соединения трех и более ветвей цепи называется **узлом** и на электрической схеме цепи изображается в виде точки.

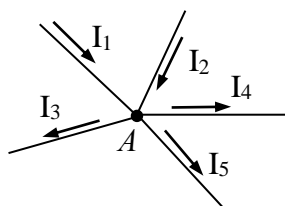


Рис. 2.6. Узел электрической цепи

Согласно первому закону Кирхгофа **сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от него**. Например, для узла *A*, приведенной на рис. 2.6 цепи можно записать:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5,$$

или, перенеся токи из правой части уравнения в левую, получим:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

В общем виде первый закон Кирхгофа имеет вид:

$$\sum I_i = 0, \quad (2.28)$$

т.е. **алгебраическая сумма токов в узле равна нулю**. Под алгебраической суммой подразумевается сумма с учетом знаков (направлений токов). Принято присваивать в уравнении положительные знаки всем втекающим токам и отрицательные – вытекающим.

Последовательное соединение резисторов – приемников энергии.

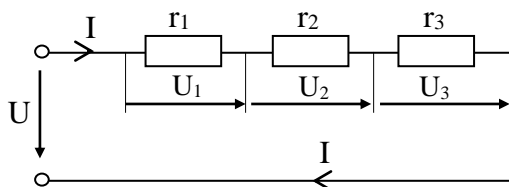


Рис. 2.7. Последовательное соединение резисторов и его свойства

Последовательным соединением резисторов – приемников энергии называется соединение, при котором они соединены один за другим без разветвлений (рис. 2.7).

☑ Запомните **основные свойства** последовательного соединения сопротивлений.

1. При наличии источника питания по сопротивлениям проходит один и то же ток *I* (рис. 2.7).
2. Напряжение на зажимах цепи (входное напряжение) равно сумме напряжений на всех ее участках, т.е.

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (2.29)$$

3. Напряжения на последовательно соединенных резисторах пропорциональны их сопротивлениям:

$$U_1 = I \cdot r_1; \quad U_2 = I \cdot r_2; \quad U_3 = I \cdot r_3. \quad (2.30)$$

4. Несколько последовательно соединенных резисторов можно заменить эквивалентным сопротивлением. При этом эквивалентное сопротивление будет равно сумме их сопротивлений:

$$r = r_1 + r_2 + r_3. \quad (2.31)$$

Пример 2.8.

В сеть напряжением 120 В включены последовательно обмотка электродвигателя с сопротивлением $r_1 = 24$ Ом и реостат с сопротивлением r_2 , которое можно изменять в пределах от 0 до 96 Ом. Определите, в каких пределах можно регулировать ток в цепи.

Решение.

Эквивалентное сопротивление цепи:

$$r = r_1 + r_2.$$

При $r_2' = 0$ сила тока в цепи будет равна:

$$I' = U / (r_1 + r_2') = 120 / (24 + 0) = 5 \text{ А.}$$

При $r_2'' = 96 \text{ Ом}$ сила тока в цепи будет равна:

$$I'' = U / (r_1 + r_2'') = 120 / (24 + 96) = 1 \text{ А.}$$

Параллельное соединение резисторов – приемников энергии.

Параллельным соединением резисторов – приемников энергии называется соединение, при котором все они соединены между двумя узлами электрической цепи (рис. 2.8).

☑ Запомните свойства параллельного соединения резисторов.

1. Напряжение при резисторах одинаково и равно напряжению между узлами:

$$U = U_1 = U_2 = U_3. \quad (2.32)$$

2. Ток в неразветвленной части цепи I равен сумме токов в ее ветвях (первый закон Кирхгофа):

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2.33)$$

3. Токи в ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей (или прямо пропорциональны

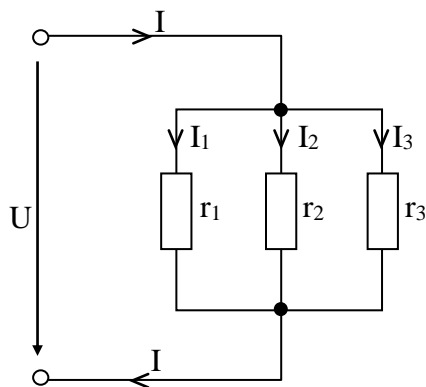


Рис. 2.8. Параллельное соединение резисторов и его свойства

их проводимостям):

$$I_1 = \frac{U_1}{r_1} = U_1 \cdot g_1; \quad I_2 = \frac{U_2}{r_2} = U_2 \cdot g_2; \quad I_3 = \frac{U_3}{r_3} = U_3 \cdot g_3. \quad (2.34)$$

4. Разветвление из нескольких резисторов можно заменить эквивалентным сопротивлением. При этом эквивалентное сопротивление, например, двух параллельных резисторов будет равно:

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}. \quad (2.35)$$

Эквивалентное сопротивление трех последовательно соединенных резисторов определяется:

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3}. \quad (2.36)$$

Как видно из 2.36 формула для определения эквивалентного сопротивления при увеличении количества параллельных резисторов усложняется, поэтому при решении задач эквивалентное сопротивление удобнее определять через проводимости параллельных ветвей, как это будет рассмотрено в примере 2.10.

Пример 2.9.

К сети напряжением 220 В подключены: электродвигатель, потребляющий мощность 5,5 кВт и 11 ламп накаливания мощностью по 100 Вт. Определить ток в подводящих проводах.

Решение.

Ток двигателя

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{5500}{220} = 25 \text{ А.}$$

Ток, потребляемый лампами накаливания,

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{100 \cdot 11}{220} = 5 \text{ A.}$$

Ток в подводящих проводах

$$I = I_1 + I_2 = 25 + 5 = 30 \text{ A.}$$

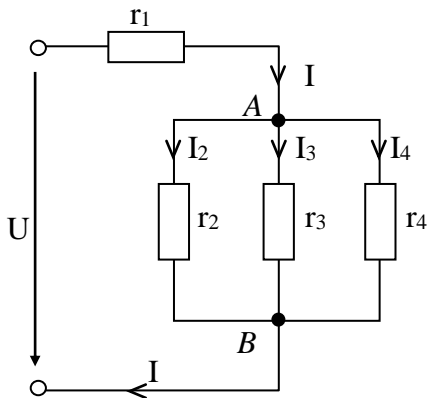


Рис. 2.9. Смешанное соединение резисторов

Смешанное соединение резисторов

Смешанным соединением называется последовательно-параллельное соединение резисторов или участков цепи.

На рис. 2.9 приведен пример смешанного соединения резисторов. Расчет такой цепи при заданном входном напряжении и известных сопротивлениях заключается в нахождении токов и напряжений на всех участках цепи.

Пример 2.10.

Определить токи и напряжения всех участков цепи, изображенной на рис. 2.9, если известны: $U = 240 \text{ В}$; $r_1 = 2,12 \text{ Ом}$; $r_2 = 20 \text{ Ом}$; $r_3 = 10 \text{ Ом}$; $r_4 = 50 \text{ Ом}$.

Решение.

Для определения тока в неразветвленной части цепи необходимо определить полное эквивалентное сопротивление цепи. Для этого сначала вычислим эквивалентное сопротивление параллельно соединенных резисторов, для чего обозначим узлы на схеме – A и B . Это сопротивление определим через проводимости ветвей:

$$g_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ См}; \quad g_3 = \frac{1}{r_3} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См}; \quad g_4 = \frac{1}{r_4} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ См}$$

$$g_{AB} = g_2 + g_3 + g_4 = 0,05 + 0,1 + 0,02 = 0,17 \text{ См.}$$

Отсюда эквивалентное сопротивление параллельного соединения между узлами A и B будет равно:

$$r_{AB} = \frac{1}{g_{AB}} = \frac{1}{0,17} = 5,88 \text{ Ом.}$$

Сопротивления r_1 и r_{AB} соединены последовательно, поэтому полное эквивалентное сопротивление цепи будет определяться их суммой:

$$r = r_1 + r_{AB} = 2,12 + 5,88 = 8 \text{ Ом.}$$

Ток в неразветвленной части цепи, а, следовательно, протекающий через r_1 определится по закону Ома:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{240}{8} = 30 \text{ A.}$$

Входное напряжение U будет распределено на r_1 и участке $A-B$ пропорционально их сопротивлениям. Напряжение на первом сопротивлении определяем по закону Ома:

$$U_1 = I \cdot r_1 = 30 \cdot 2,12 = 63,6 \text{ В.}$$

Напряжение U_{AB} определяем по закону Ома:

$$U_{AB} = I \cdot r_{AB} = 30 \cdot 5,88 = 176,4 \text{ В.}$$

Это напряжение позволяет вычислить токи, протекающие по параллельным ветвям по закону Ома:

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{r_2} = \frac{176,4}{20} = 8,82 \text{ A}; \quad I_3 = \frac{U_{AB}}{r_3} = \frac{176,4}{10} = 17,64 \text{ A}; \quad I_4 = \frac{U_{AB}}{r_4} = \frac{176,4}{50} = 3,54 \text{ A.}$$

Примечание. Ток через r_4 можно определить, используя первый закон Кирхгофа для узла, например, A :

$$I = I_2 + I_3 + I_4 \Rightarrow I_4 = I - I_2 - I_3 = 30 - 8,82 - 17,64 = 3,54 \text{ A.}$$

Ответ приведем в виде таблицы.

U, В	I, А	$r_1 = 2,12 \text{ Ом}$		$r_2 = 20 \text{ Ом}$		$r_3 = 10 \text{ Ом}$		$r_4 = 50 \text{ Ом}$	
240	30	$I_1, \text{ А}$	$U_1, \text{ В}$	$I_2, \text{ А}$	$U_2, \text{ В}$	$I_3, \text{ А}$	$U_3, \text{ В}$	$I_4, \text{ А}$	$U_4, \text{ В}$
		30	63,6	8,82	176,4	17,64	176,4	3,54	176,4

Условие баланса мощностей.

Условие баланса мощностей выражается уравнением баланса:

$$\sum_i E_i \cdot I_i = \sum_k r_k \cdot I_k^2, \quad (2.37)$$

которое демонстрирует закон сохранения энергии: количество суммарной мощности, вырабатываемой источниками эдс равно суммарной мощности, потребленной нагрузкой (сопротивлениями). Левая часть уравнения содержит сумму мощностей (см. формулы 2.37), вырабатываемых источниками питания, количество которых в цепи равно i . Правая часть уравнения содержит сумму потребляемых сопротивлениями мощностей, количество которых в цепи равно k .

Часто уравнение баланса мощностей используют для проверки правильности расчета токов в цепи. Рассмотрим применение уравнения баланса на примере 2.10 для проверки верности расчета токов, протекающих через резисторы.

Рассчитаем левую часть уравнения. При этом учтем, что источник питания в рассматриваемой цепи один, подключенный к входу цепи:

$$\sum_i E_i \cdot I_i = U \cdot I = 240 \cdot 30 = 7200 \text{ Вт.}$$

Рассчитаем сумму мощностей, потребляемых резисторами:

$$\sum_k r_k \cdot I_k^2 = r_1 \cdot I^2 + r_2 \cdot I_2^2 + r_3 \cdot I_3^2 + r_4 \cdot I_4^2 = 2,12 \cdot 30^2 + 20 \cdot 8,82^2 + 10 \cdot 17,64^2 + 50 \cdot 3,54^2 = 7202,1 \text{ Вт.}$$

Погрешность вычислений в результате округления значений токов составляет 2,1 Вт или всего 0,03%.

Второй закон Кирхгофа. Согласно второму закону Кирхгофа *во всяком замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма эдс U равна алгебраической сумме падений напряжений $I \cdot r$ в отдельных сопротивлениях этого контура:*

$$\sum E = \sum (I \cdot r) \quad (2.38)$$

Замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называется **контуром** электрической цепи. Например, в цепи, приведенной на рис. 2.10 можно мысленно провести три контура. Направления обхода любого контура выбираются произвольно.

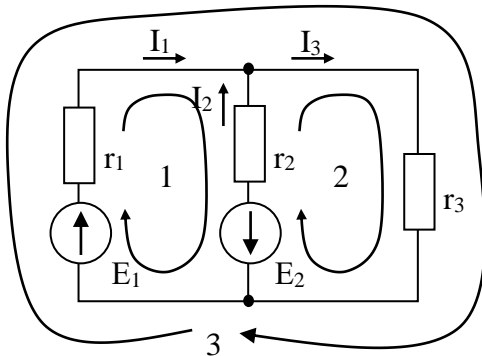


Рис. 2.10. Электрическая цепь для пояснения II закона Кирхгофа

Выражение «алгебраическая сумма» означает сумму с учетом направлений, а следовательно знаков эдс и напряжений. При записи левой части уравнений для каждого контура необходимо учитывать, что знак «+» записывается для тех E , направления которых совпадает с направлением обхода контура, в противном случае используется знак «-».

Аналогично, при записи правой части уравнений знак «+» присваивается напряжениям ($I \cdot r$) в том случае, если направление обхода контура совпадает с током в ветви I , в противном случае – знак «-».

Запишем уравнение, например, для 1-го контура цепи.

$$E_1 - E_2 = r_1 \cdot I_1 - r_2 \cdot I_2.$$

Уравнение для 3-го контура будет иметь вид:

$$E_1 = r_1 \cdot I_1 + r_3 \cdot I_3.$$

Первый и второй законы Кирхгофа используются для расчетов сложных электрических цепей.

1.3. Химические источники тока

Элементы. Между электродом и электролитом, в который он погружен всегда возникает разность потенциалов, зависящая от материала электрода и состава электролита.

Появление электродного потенциала объясняется тем, что вещество электрода под действием химических реакций растворяется в электролите (например, цинк в растворе серной кислоты) и его положительные ионы переходят в электролит. Преобладание отрицательных зарядов на электроде и положительных – в прилегающем к нему пограничном слое электролита вызывает появление двойного электrolитического слоя, а, следовательно, и электрического поля на границе электрода, направленного от электролита к электроду. Электрическое поле противодействует переходу положительных ионов с электрода в раствор, уравнивая химические силы растворения электрода. Таким образом, возникает электродный потенциал.

Помещая в электролит два электрода из разных металлов, получаем между ними разность потенциалов – эдс $E = \varphi_1 - \varphi_2$.

Следовательно, устройство, состоящее из двух разнородных электродов, помещенных в электролит, является источником эдс – первичным источником тока или элементом, в котором происходит необратимый процесс преобразования химической энергии в электрическую.

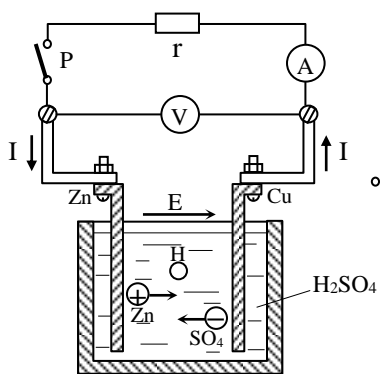


Рис. 2.11. Элемент Вольта и схема его включения

Из многих типов элементов в качестве примера рассмотрим элемент Вольта (рис. 2.11). Он состоит из погруженных в водный раствор серной кислоты (H_2SO_4), цинкового (Zn) и медного (Cu) электродов. Первый имеет отрицательный заряд (катод), второй – положительный (анод). Электродвижущая сила элемента составляет порядка 1,1 В.

При нагрузке элемента, т.е. при прохождении по нему тока, отрицательные ионы SO_4 и положительные ионы цинка Zn соединяясь, образуют молекулы цинкового купороса $ZnSO_4$. Одновременно положительные ионы водорода отнимают у анода электроны и превращаются в нейтральные атомы водорода. Атомы водорода, покрывая тонким слоем анод, вызывают увеличение внутреннего сопротивления элемента и уменьшение его эдс. Это явление называется *поляризацией*. Водородный слой у анода устраняют, применяя деполяризаторы – вещества, легко отдающие кислород (например, перекись марганца), который соединяясь с водородом образует воду.

Большое распространение получили сухие и наливные марганцово-цинковые элементы. По конструкции они делятся на стаканчиковые и галетные.

Номинальным разрядным током элемента называется длительный ток, допускаемый при его эксплуатации. Емкостью элемента называется количество электричества, выраженное в ампер-часах (А·ч), которое можно получить от элемента за весь период его работы.

Аккумуляторы (вторичные химические источники тока). Химические источники тока, у которых после их разряда возможен обратный процесс заряда с

преобразованием электрической энергии в химическую, называются *аккумуляторами* или вторичными элементами.

Наибольшее распространение получили аккумуляторы: свинцовые (кислотные) и никель-кадмиевые, никель-железные и серебряно-цинковые (щелочные).

Свинцовый аккумулятор состоит из двух блоков – пластин, погруженных в электролит – 25 – 35%-ный раствор серной кислоты.

Положительные пластины из свинца для увеличения поверхности соприкосновения с электролитом имеют ребристую поверхность или выполнены из свинцовых каркасов, заполненных активной массой (перекись свинца).

Отрицательные пластины представляют собой свинцовые каркасы, заполненные активной массой в виде губчатого свинца. Пластины после изготовления подвергаются электролитической обработке – формовке.

При разрядке, т.е. в режиме, когда заряженный аккумулятор замкнут на внешнюю цепь, проходит разрядный ток, аккумулятор работает в режиме источника. При этом активная масса положительной пластины, состоящая из перекиси свинца $PbSO_4$ с выделением воды. Это приводит к уменьшению концентрации электролита, его проводимости и эдс. Полезно запомнить, что напряжение (эдс) сначала быстро падает с 2,2 В до 2 В, а затем медленнее – до 1,8 В, после чего необходимо прекратить дальнейший разряд во избежание сульфации пластин – образования на них нерастворимого сернокислого свинца.

При заряде аккумулятора через него проходит, имеющий направление, противоположное разрядному току, для чего зажимы источника, заряжающего аккумулятор, соединяются с одноименными зажимами аккумулятора.

При заряде происходит обратная химическая реакция и на электродах восстанавливаются перекись свинца и губчатый свинец. Напряжение сначала быстро увеличивается до 2,2 В, затем медленно до 2,6 – 2,7 В, при котором следует прекратить дальнейший заряд. При этом напряжении наблюдается интенсивное выделение водорода, пузырьки которого создают впечатление кипения.

Внутреннее сопротивление свинцовых аккумуляторов мало, поэтому токи короткого замыкания недопустимо велики.

Емкость аккумулятора определяется в А·ч за время нормального разряда.

Отдачей аккумулятора по емкости называется отношение отданного им при разряде количества электричества к полученному при заряде:

$$\eta = Q_P / Q_3. \quad (2.39)$$

Отдача свинцового аккумулятора 0,9 – 0,95.

Коэффициентом полезного действия аккумулятора называется отношение полученной от него при разряде энергии к затраченной при заряде:

$$\eta = W_P / W_3. \quad (2.40)$$

Кпд свинцового аккумулятора составляет 0,75 – 0,8.

Во избежание сульфации аккумулятора необходимо содержать его в заряженном состоянии и периодически проверять его уровень и плотность электролита, напряжение под нагрузкой, а при необходимости дозаряжать его.

Щелочные аккумуляторы получили такое название по их электролиту щелочи – 21%-ный водный раствор едкого калия (KOH) или едкого натра (NaOH). Они состоят из двух блоков пластин, расположенных в стальном сосуде с электролитом. Пластины представляют собой стальные рамки с вставленными в них стальными коробочками, заполненные активной массой. Активная масса отрицательных пластин никель-кадмиевых элементов состоит из губчатого кадмия, а никель-железных – из губчатого железа. Активная масса положительных пластин у обоих аккумуляторов состоит из гидрата окиси никеля $Ni(OH)_2$.

При разряде гидрат окиси никеля переходит в гидрат закиси никеля, а губчатый кадмий (железо) – в гидрат его закиси. При заряде реакция идет в обратном направлении и, следовательно, происходит восстановление активной массы электродов. Концентрация электролита при разряде остается неизменной.

При разряде напряжение с 1,4 В сначала быстро уменьшается до 1,3 В, а затем медленно до 1,1 В, при котором необходимо прекратить заряд. При заряде напряжения с 1,15 В быстро увеличивается до 1,75 В, а затем медленно увеличивается до 1,85 В. Внутреннее сопротивление щелочных аккумуляторов больше, чем у кислотных, поэтому они имеют более низкий КПД $\eta = 0,5 \div 0,6$ и меньшую чувствительность к коротким замыканиям. Щелочные аккумуляторы имеют большую механическую прочность, большой срок службы и меньшую требовательность к уходу по сравнению с кислотными аккумуляторами.

Серебряно-цинковый аккумулятор состоит из двух блоков пластин, расположенных в пластмассовом баке с электролитом. Электроды аккумулятора представляют собой пористые пластины, положительная – из окиси серебра (Ag_2O), а отрицательный – из цинка (Zn). Электролит водный раствор едкого калия (KOH) плотностью 1,4.

При заряде аккумулятора окись серебра переходит в металлическое серебро, а металлический цинк – в окись цинка. При заряде имеет место обратный процесс.

Достоинствами являются: значительно большая емкость и мощность на единицу массы по сравнению с другими типами аккумуляторов; стабильное напряжение при разряде (1,5 В) и возможность получения очень больших токов при кратковременных разрядах; высокий КПД $\eta \approx 0,85$.

Соединение химических элементов. Если напряжение и ток, необходимые для питания потребителей, превышают соответствующие величины одного источника, то применяется соединение нескольких источников в батарею для совместной работы.

Элементы, соединяемые в батарею, должны иметь одинаковые ЭДС E_0 и одинаковые внутренние сопротивления r_0 .

Последовательное соединение элементов (рис. 2.12) применяется в том случае, если ток потребителя не превышает номинальный ток одного элемента, а напряжение потребителя U больше ЭДС элемента E_0 . В этом случае число элементов n , соединенных последовательно, определяется соотношением $n \geq U / E_0$. При одинаковом направлении E_0 элементов итоговая ЭДС батареи:

$$E = n \cdot E_0; \quad (2.41)$$

внутреннее сопротивление батареи:

$$r = n \cdot r_0. \quad (2.42)$$

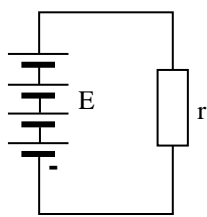


Рис. 2.12.
Последовательное
соединение элементов

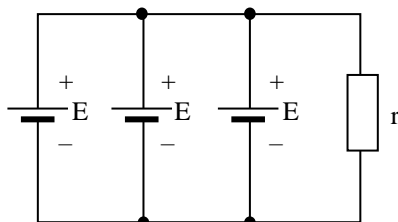


Рис. 2.13.
Параллельное
соединение элементов

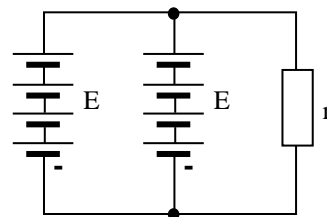


Рис. 2.14.
Групповое
соединение элементов

Разрядный ток батареи равен разрядному току элемента.

Параллельное соединение элементов (рис. 2.13) применяется в том случае если напряжение потребителя U равно напряжению элемента U_0 , а ток потребителя I значительно больше разрядного тока элемента I_p . В этом случае число элементов m , соединенных параллельно, определяется отношением $m > I / I_p$.

Результирующая ЭДС батареи равна ЭДС каждого элемента:

$$E = E_0; \quad (2.43)$$

внутреннее сопротивление батареи:

$$r = r_0 / m; \quad (2.44)$$

разрядный ток батареи в m раз больше разрядного тока элемента:

$$I = I_p \cdot m. \quad (2.45)$$

Групповое соединение – это сочетание последовательного и параллельного соединений элементов (рис. 2.14). Оно применяется в тех случаях, когда напряжение и ток потребителя больше номинальных напряжения и тока элемента. Число последовательно соединенных элементов n в группе и число параллельных групп m определяются из ранее приведенных условий.

Вопросы самоконтроля

1. Приведите пример узла электрической цепи, произвольно выберите направления токов в ветвях и запишите уравнение по первому закону Кирхгофа.
2. Приведите пример последовательного соединения сопротивлений, перечислите свойства последовательного соединения сопротивлений.
3. Приведите пример параллельного соединения сопротивлений, перечислите свойства параллельного соединения сопротивлений.
4. Какое соединение сопротивлений является смешанным? Приведите пример цепи со смешанным соединением резисторов.
5. Поясните второй закон Кирхгофа на примере второго контура цепи, приведенной на рис. 2.10.
6. В чем заключается условие баланса мощностей в электрической цепи?
7. Чем отличаются первичный химический элемент от вторичного?
8. Какими условиями необходимо руководствоваться при выборе схемы соединения элементов?

Практическая часть

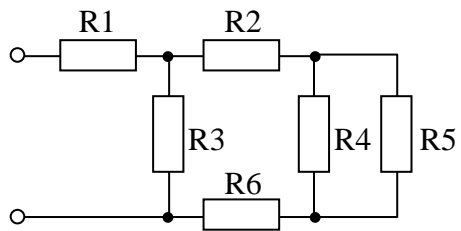
Задача 7

Произвести расчет значения эквивалентного сопротивления электрической цепи относительно ее входа. Значения сопротивлений приведены в табл. 7.

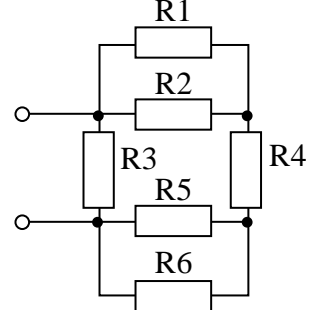
Таблица 7

№ Вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R1, Ом	3	5	8	6	9	7	2	4	6	3
R2, Ом	4	8	3	4	5	5	6	3	8	9
R3, Ом	8	6	5	2	7	4	8	6	4	5
R4, Ом	6	3	6	5	6	6	9	5	9	6
R5, Ом	5	7	4	9	4	8	3	8	3	4
R6, Ом	9	2	1	8	3	3	5	9	5	8

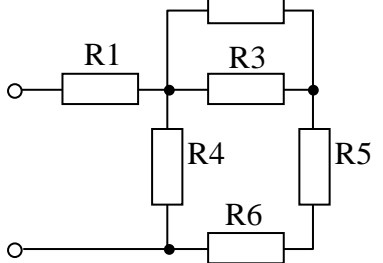
Вариант 1



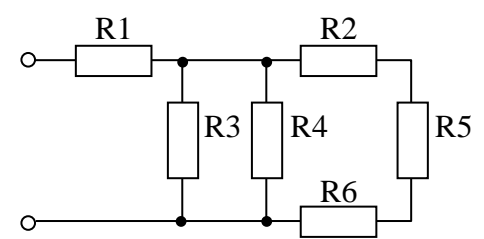
Вариант 2



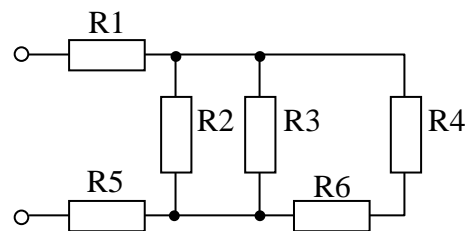
Вариант 3



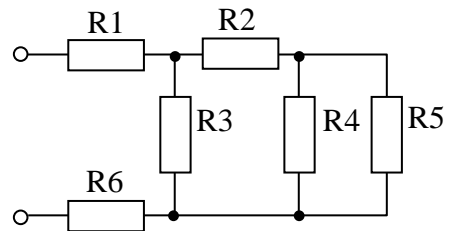
Вариант 4



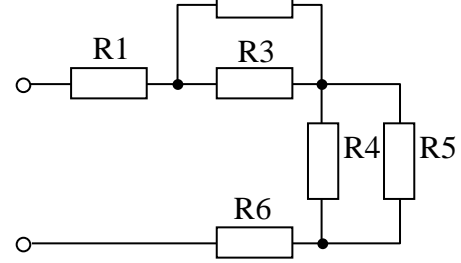
Вариант 5



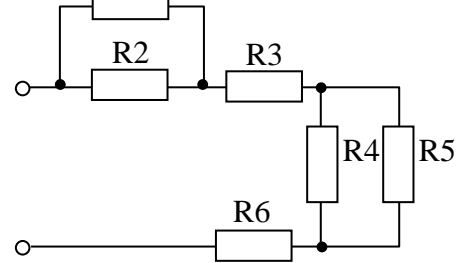
Вариант 6



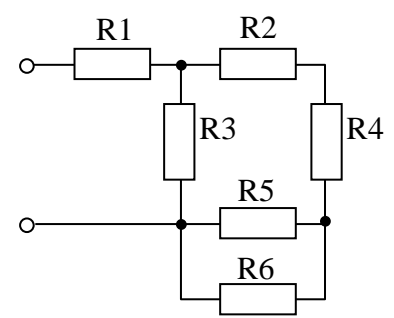
Вариант 7



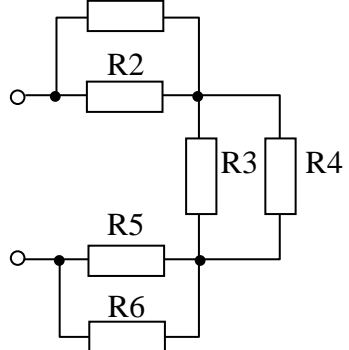
Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10

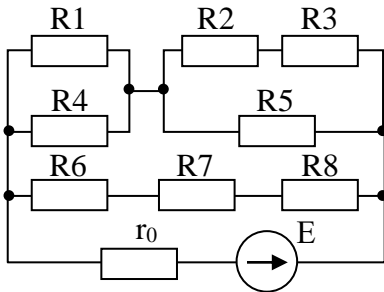


Домашнее задание

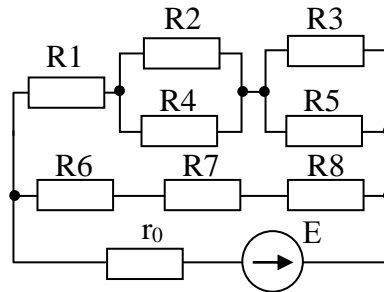
Задача 8

Обозначив узлы схемы, произвести расчет токов и напряжений для всех ветвей электрической цепи. Произвести проверку расчетов токов уравнением баланса мощностей. Параметры элементов электрической цепи приведены в табл. 8.

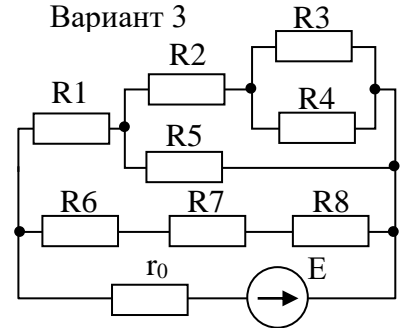
Вариант 1



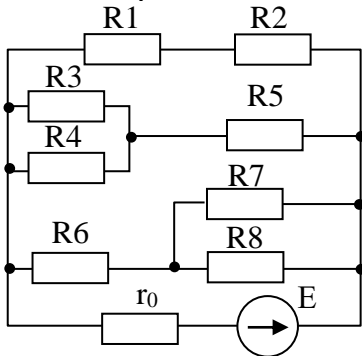
Вариант 2



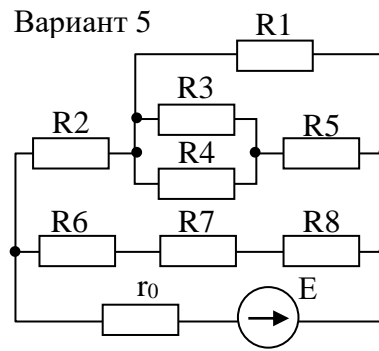
Вариант 3



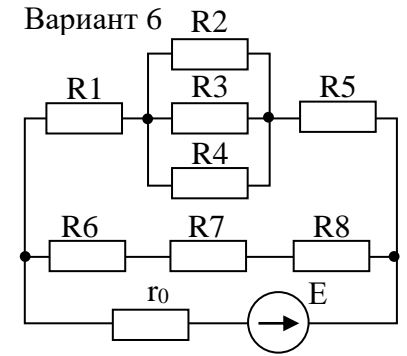
Вариант 4



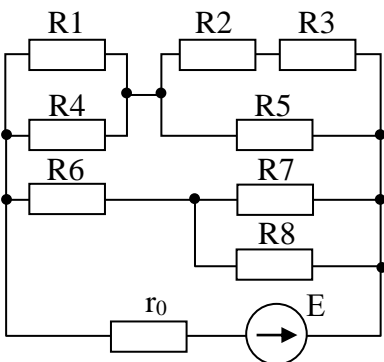
Вариант 5



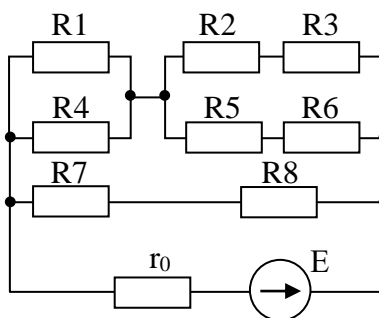
Вариант 6



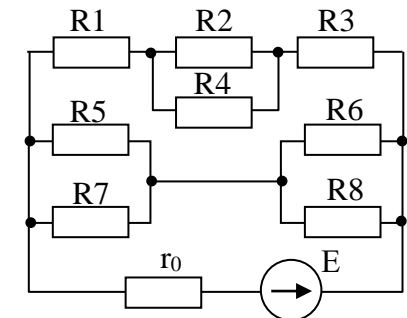
Вариант 7



Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10

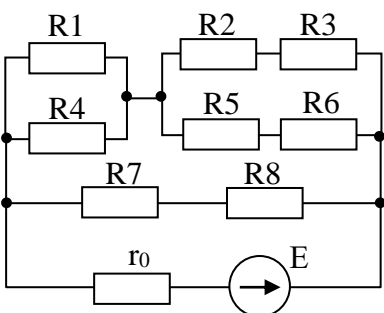


Таблица 8

№ Вар	E, В	r ₀ , Ом	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом	R6, Ом	R7, Ом	R8, Ом
1	4	0,1	20	20	5	7	17	17	7	5
2	6	0,15	18	15	6	8	12	10	5	3
3	8	0,2	5	8	15	12	10	7	3	3
4	10	0,25	6	10	5	7	12	15	3	8
5	12	0,3	10	12	7	8	5	15	4	2
6	3	0,35	15	8	12	6	10	4	13	3
7	5	0,4	7	9	14	10	5	15	20	3
8	7	0,45	5	14	15	20	6	8	9	12
9	9	0,5	8	10	14	5	18	12	6	3
10	15	0,55	3	15	10	5	7	9	12	20

ЗАДАНИЕ 4

Задание:

1. Изучить теоретический материал (время – 60 мин.).
2. Ответить на вопросы самоконтроля (устно) (время 10 мин.).
3. Практическая часть: тест промежуточного контроля (время 20 мин.).
4. Домашнее задание: письменно решить 2 задачи (время 30 мин.).

Теоретическая часть

Раздел 3. Электромагнетизм

3.1. Понятие о магнитодвижущей силе

Электрический ток в проводе и его магнитное поле представляют собой неотделимы друг от друга стороны единого электромагнитного процесса, однако принято говорить, что электрический ток обладает свойством возбуждать магнитное поле. Это свойство тока характеризуют **намагничивающей силой** (нс) или, что то же самое **магнитодвижущей силой** (мдс), которую обозначают буквой F .

Формально мдс вызывает или возбуждает магнитное поле подобно тому, как эдс вызывает электрический ток в цепи.

В СИ мдс принимается численно равной силе тока, вызывающего магнитное поле, так, что мдс провода с током $F = I$. Если ток проходит по контуру или по катушке с числом витков w , то магнитодвижущая сила равна произведению тока и числа витков, т.е. $F = I \cdot w$.

Поскольку количество витков безразмерная величина, то мдс, так же как и ток, измеряется в **амперах (А)**.

Для определения направления мдс катушки или витка с током удобно пользоваться правилом **правой руки**: *если охватить катушку (виток) правой рукой так, чтобы четыре пальца ее расположились по направлению тока в витках катушки, то отогнутый большой палец руки укажет направление мдс*. На рис. 3.1 приведено несколько примеров катушек с током и направления в них мдс, определенные по данному правилу.

Магнитодвижущая сила в симметричных полях, например, кольцевой катушки, равномерно распределяется вдоль магнитной линии. Доля мдс, приходящаяся на единицу длины магнитной линии, называется **напряженностью магнитного поля H** и является одним из параметров поля.

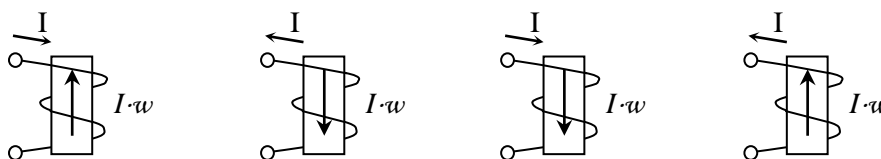


Рис. 3.1. Магнитодвижущие силы катушек с током

Напряженность магнитного поля в заданной точке зависит от силы тока, формы проводника и в однородной среде не зависит от свойств среды (вещества). Напряженность поля является векторной величиной. Напряженность магнитного поля в СИ измеряется в ампер на метр:

$$[H] = \left[\frac{F}{l} \right] = \frac{A}{m}.$$

3.2. Закон полного тока

Полным током называется алгебраическая сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную замкнутым контуром.

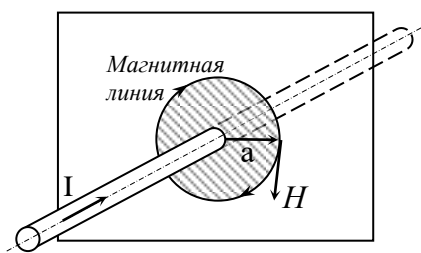


Рис. 3.2. Провод с током, проходящий через поверхность, перпендикулярную к оси провода

Для напряженности магнитного поля на расстоянии a (рис. 3.2) от оси прямолинейного провода с током I можно записать:

$$I = H \cdot 2 \cdot \pi \cdot a = H \cdot l. \quad (3.1)$$

Произведение напряженности магнитного поля H и длины магнитной линии $l = 2\pi a$, ограничивающей замкнутый контур, представляет собой мдс F_M . Поверхность, ограниченную магнитной линией (рис. 3.2), в рассматриваемом случае пронизывает один ток I , так что алгебраическая сумма токов $\sum I = I$.

Выражение 3.1 можно переписать в другом виде:

$$\sum I = F_M. \quad (3.2)$$

Таким образом, мдс вдоль контура равна полному току, пронизывающему поверхность, ограниченную этим контуром. Полученное соотношение носит название **закона полного тока**. Он рассмотрен на простейшем примере.

Если напряженность поля на различных участках магнитной линии неодинакова, то мдс находится как сумма произведений $H \cdot l$ всех участков, т.е.

$$F_M = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + \dots = \sum H \cdot l. \quad (3.3)$$

3.3. Магнитная индукция, магнитная проницаемость, магнитный поток

При прохождении постоянного тока I по катушке с числом витков w напряженность поля H остается неизменной. В частности, она остается неизменной при внесении внутрь катушки стального сердечника. При этом интенсивность поля внутри катушки значительно возрастает за счет молекулярных токов сердечника, т.е. за счет изменения состояния среды (сердечника), в которой существует магнитное поле. Интенсивность поля в каждой его точке с учетом влияния среды характеризуется **магнитной индукцией B** .

Магнитная индукция – вектор, определяемый по силовому воздействию магнитного поля на ток. Таким образом, магнитная индукция является силовой характеристикой поля.

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением касательной к магнитным линиям и в изотропных средах – с направлением вектора напряженности поля. Так как, кроме того, плотность магнитных линий пропорциональна интенсивности поля, которая характеризуется магнитной индукцией, то магнитные линии являются линиями магнитной индукции.

Магнитная индукция и напряженность поля связаны простым соотношением

$$B = \mu_a \cdot H, \quad (3.4)$$

где μ_a – **абсолютная магнитная проницаемость**.

Сравнивая магнитное поле тока провода в данной среде и в вакууме, установили, что в зависимости от свойств среды (материала) поле получается более интенсивным, чем в вакууме (парамагнитные материалы) или, наоборот, менее интенсивным (диамагнитные материалы). Таким образом, интенсивность магнитного поля, т.е. индукция B , зависит от среды, в которой существует поле.

Абсолютная магнитная проницаемость вакуума называется **магнитной постоянной μ_0** . В СИ она равна

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{с}/\text{м}.$$

Единица $\text{Ом} \cdot \text{с}$ называется **Генри (Г)**, это единица измерения индуктивности. Таким образом,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г}/\text{м} \approx 125 \cdot 10^{-8} \text{ Г}/\text{м}. \quad (3.5)$$

Абсолютную магнитную проницаемость различных материалов (сред) сравнивают с магнитной постоянной. Отношение абсолютной магнитной проницаемости, какого-либо

материала к магнитной постоянной называется **магнитной проницаемостью** μ (или **относительной магнитной проницаемостью**), так, что

$$\mu = \mu_a / \mu_0. \quad (3.6)$$

Относительная магнитная проницаемость – отвлеченное число. Для диамагнитных материалов и сред $\mu < 1$. Например, для меди $\mu = 0,999995$. Для парамагнитных веществ $\mu > 1$, например, для воздуха $\mu = 1,0000031$. В технических расчетах магнитная проницаемость принимается равной единице.

У ферромагнитных материалов магнитная проницаемость достигает десятков тысяч и зависит от вида материала, температуры, индукции и напряженности магнитного поля.

Из выражения 3.4. можно определить единицу измерения магнитной индукции

$$[B] = [\mu_a \cdot H] = [\mu_0 \cdot \mu \cdot H] = \frac{\Gamma}{\text{м}} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \text{Т}.$$

Единица $\text{В} \cdot \text{с}$ называется **вебер** (Вб) – это единица измерения магнитного потока.

Единицу $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$ называют **тесла** (Т). Таким образом, в СИ магнитная индукция измеряется в теслах.

Произведение магнитной индукции B однородного поля и поверхности площадки S , перпендикулярной вектору этой индукции, называется **магнитным потоком**:

$$\Phi = B \cdot S. \quad (3.7)$$

В СИ единицей магнитного потока служит вебер.

3.4. Электромагнитная сила

Прямолинейный провод в магнитном поле. Прямолинейный провод с током I , расположенный в магнитном поле перпендикулярно его направлению (рис. 3.3, а), испытывает действие магнитной силы F . Эта сила пропорциональна току, длине той части провода l , которая расположена в рассматриваемом магнитном поле (активной длине), и магнитной индукции B :

$$F = I \cdot B \cdot l. \quad (3.8)$$

Если ток выражен в амперах, магнитная индукция в теслах, а длина в метрах, то сила выражена в **ньютон**ах (Н).

Направление электромагнитной силы F (рис. 3.3, б) определяется по **правилу левой руки**: если расположить ладонь левой руки так, чтобы вектор магнитной индукции входил в нее, а вытянутые четыре пальца совпадали с направлением тока, то отогнутый под прямым углом большой палец укажет направление электромагнитной силы.

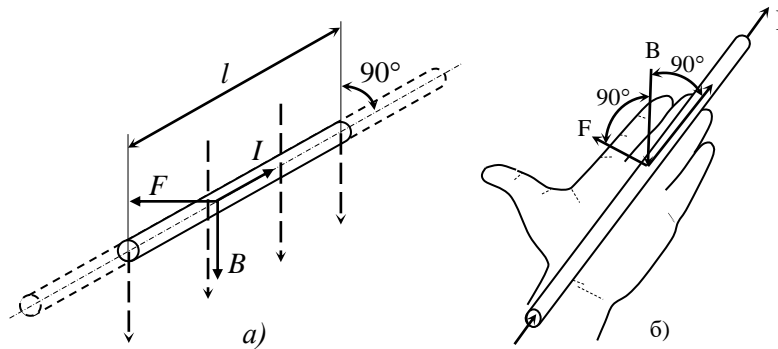


Рис. 3.3. Провод с током в магнитном поле (а);
правило левой руки (б)

Если расположенный в однородном магнитном поле проводник поворачивать так, чтобы изменился угол α , образованный направлением проводника и направлением поля, то при неизменных I , B , l сила, действующая на проводник, будет изменяться пропорционально $\sin \alpha$. Когда проводник расположен параллельно магнитным линиям, электромагнитная сила равна нулю.

Таким образом, в общем случае электромагнитная сила:

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (3.9)$$

Силовое воздействие магнитного поля на проводники с током широко используется в большом числе электромагнитных механизмов и, в частности, в электрических двигателях.

Представим, что прямолинейный провод с током I расположен в однородном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной силовым линиям. Под действием электромагнитной силы проводник переместится в соответствии с ее направлением на расстояние b . Таким образом, электромагнитной силой будет совершена работа:

$$A = F \cdot b = I \cdot B \cdot l \cdot b = I \cdot \Phi. \quad (3.10)$$

Следовательно, механическая работа, совершенная за счет источника питания электромагнитными силами равна произведению тока в проводе и пересеченного им магнитного потока в процессе своего передвижения.

Контур в магнитном поле. Стороны прямоугольной катушки или рамки с током (рис. 3.4, а), расположенные перпендикулярно плоскости рисунка, находятся в однородном поле. Электромагнитные силы F создают вращающий момент. Под действием этого момента рамка стремится занять положение, при котором эти силы взаимно уравновесятся (рис. 3.4, б), при этом рамка будет пронизываться наибольшим магнитным потоком.

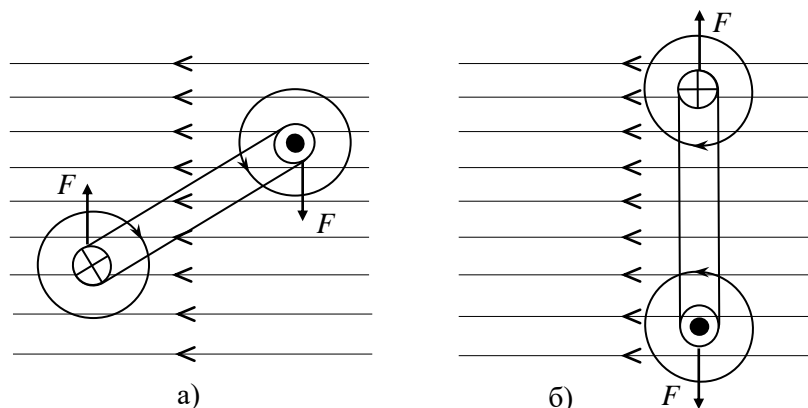


Рис. 3.4. Электромагнитное поле, создающее вращающий момент

3.5. Ферромагнетики и их свойства

Явление намагничивания и перемангничивания. Материалы, обладающие большой магнитной проницаемостью, называются **ферромагнетиками**. К ним относятся: сталь, железо, никель, кобальт, их сплавы и др.

Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств элементарных носителей магнетизма – движущихся внутри атомов электронов, а также от совместного действия их групп.

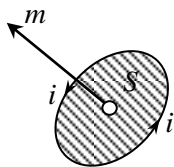


Рис. 3.5. Магнитный момент элементарного тока

Электроны в атомах, двигаясь по орбитам вокруг ядра атома, образуют *элементарные токи* или **магнитные диполи**, которые характеризуются **магнитным моментом диполя m** . Магнитный момент диполя равен произведению элементарного тока i и элементарной площадки S (рис. 3.5), ограниченной элементарным контуром, $m = i \cdot S$. Вектор m направлен перпендикулярно площадке S по правилу буравчика. **Магнитный момент тела** представляет собой геометрическую сумму магнитных моментов всех диполей.

Кроме рассмотренных орбитальных моментов электроны, вращаясь вокруг своих осей, создают еще так называемые **спиновые моменты**, которые играют важнейшую роль в намагничивании ферромагнетиков.

В ферромагнетиках образуются отдельные самопроизвольно намагниченные области ($10^{-2} - 10^{-6} \text{ см}^3$), называемые магнитными доменами, спиновые моменты которых ориентируются параллельно. Если ферромагнетик не находится во внешнем поле, то магнитные моменты отдельных доменов направлены самым различным образом и суммарный магнитный момент тела равен нулю – ферромагнетик не намагничен. Внесение ферромагнетика во внешнее магнитное поле, например катушки с током, вызывает поворот магнитных моментов части доменов в направлении внешнего поля и рост размеров тех доменов, направления магнитных моментов которых близки к направлению внешнего поля. В результате ферромагнетик намагничивается.

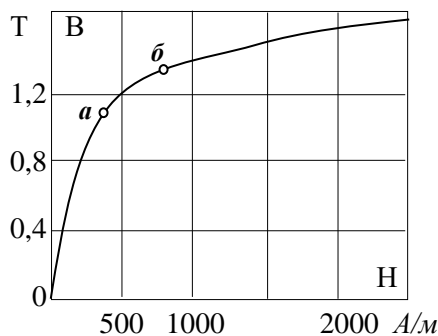


Рис. 3.6. Начальная кривая намагничивания стали

Если при увеличении внешнего поля все домены будут ориентированы в направлении внешнего поля и прекратится рост доменов, то наступит состояние предельной намагниченности ферромагнетика, называемое **магнитным насыщением**.

В магнитной цепи, образованной преимущественно ферромагнитными участками, можно получить большую магнитную индукцию при относительно малой мдс.

Профессор Московского университета А.Г. Столетов в 1872 г., помещая стальной сердечник в катушку с током и измеряя магнитную индукцию в

нем B при различных значениях напряженности поля H , впервые получил зависимость $B = f(H)$, которая изображается начальной кривой намагничивания (рис. 3.6). Кривая состоит из трех участков:

- прямолинейный участок $0a$ показывает, что в начале магнитная индукция быстро растет почти пропорционально напряженности;
- участок AB , называемый коленом кривой, на котором рост магнитной индукции замедляется;
- участок, расположенный за коленом кривой, что здесь зависимость между B и H линейна, но нарастание магнитной индукции происходит медленно вследствие магнитного насыщения.

Нелинейная зависимость $B = f(H)$ показывает, что магнитная проницаемость ферромагнетика непостоянна $\mu_a = \frac{B}{H}$ и зависит от напряженности поля.

При работе в цепях переменного поля происходит периодическое перемагничивание ферромагнетика.

При увеличении намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля H магнитная индукция достигает максимального значения $+B_M$ (рис. 3.7). При уменьшении H

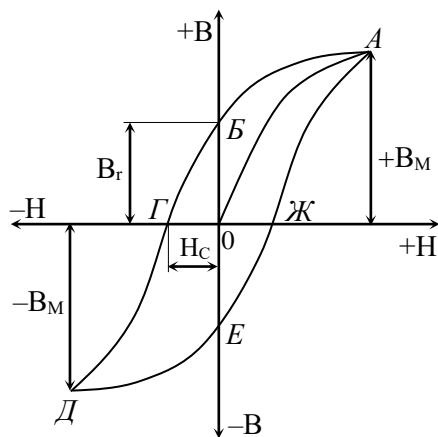


Рис.3.7. Петля гистерезиса

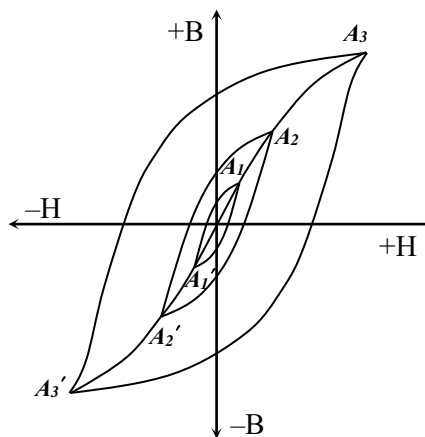


Рис.3.8. Три петли гистерезиса и основная кривая намагничивания стали

магнитная индукция уменьшается, но при тех же значениях H она имеет несколько большие значения, чем при нарастании (участок кривой AB). При напряженности поля $H = 0$ магнитная индукция называется остаточной B_r (отрезок OB на рис. 3.7).

Из этого следует, что магнитная индукция зависит не только от напряженности поля, но и от предварительного магнитного состояния ферромагнетика. Рассмотренное явление запаздывания магнитной индукции называется **магнитным гистерезисом**. Оно вызывается как бы внутренним трением, возникающим при изменении ориентации магнитных моментов доменов.

При изменении направления намагничивающего тока меняется и направление напряженности магнитного поля. Доведя его до значения H_c , называемого **коэрцитивной силой** (отрезок OC), получим индукцию $B = 0$.

При дальнейшем увеличении H обратного направления магнитная индукция достигает значения $-B_M$. Далее, уменьшая H до нуля, получим уменьшение B до значения остаточной индукции (отрезок OE). Наконец, изменив еще раз направление H и увеличив ее снова, получим индукцию $+B_M$.

Таки образом при циклическом перемагничивании ферромагнетика зависимость $B = f(H)$ графически можно представить замкнутой кривой – **симметричной петлей гистерезиса $ABГДЕЖА$** . Наибольшая из возможных петель для данного материала называется *предельной петлей*.

Построив для данного ферромагнетика несколько симметричных петель с разными значениями B_M (рис. 3.8) и соединив вершины петель, получим **основную кривую намагничивания**, близкую к кривой начального намагничивания.

Перемагничивание стали вызывает нагрев, что связано с потерями энергии на гистерезис.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затраченной на один цикл перемагничивания.

Мощность удельных потерь на гистерезис, выраженная в Bm/kg массы сердечника, зависит от сорта стали, магнитной индукции и числа циклов перемагничивания стали в секунду, или, что то же, частоты переменного тока f в обмотке электромагнита.

Основная кривая намагничивания и петля гистерезиса характеризует свойства магнитных материалов. Три петли, типичные для мягкой стали, пермаллоя и твердой стали приведены на рис. 3.9.

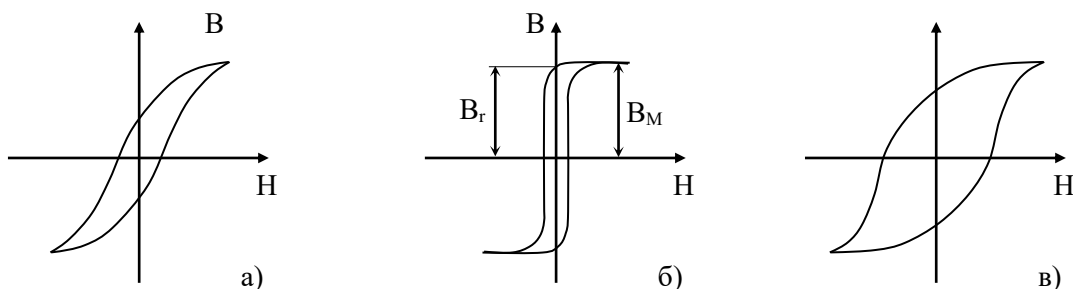


Рис. 3.9. Петли гистерезиса для различных материалов:
 а – магнитомягкий материал, электротехническая сталь;
 б – магнитомягкий материал, пермаллой (прямоугольная петля);
 в – магнитотвердый материал

Ферромагнитные материалы

Магнитомягкие материалы. Магнитомягкие материалы обладают высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой H_c (менее 400 А/м) и малыми удельными потерями. К этой группе относятся: техническое железо, низкоуглеродистые стали, листовые электротехнические стали, некоторые железно-никелевые сплавы (пермаллой) и оксидные ферромагнетики. Они применяются для изготовления магнитопроводов постоянного и переменного потоков.

Техническое железо (углерода до 0,04%) обладает высокой индукцией насыщения (до 2,2 Т), высокой магнитной проницаемостью ($\mu = 3500 \div 7000$), низкой коэрцитивной силой ($H_c = 50 \div 100$ А/м). Техническое железо, углеродистые стали и чугун применяются для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях.

Листовые электротехнические стали представляют собой сплавы железа с кремнием (1 – 4%). Кремний улучшает свойства технического железа: увеличивает магнитную проницаемость, уменьшает коэрцитивную силу, уменьшает потери на гистерезис и, главное, увеличивает удельное электрическое сопротивление, а следовательно, уменьшает вихревые токи и связанные с ними потери.

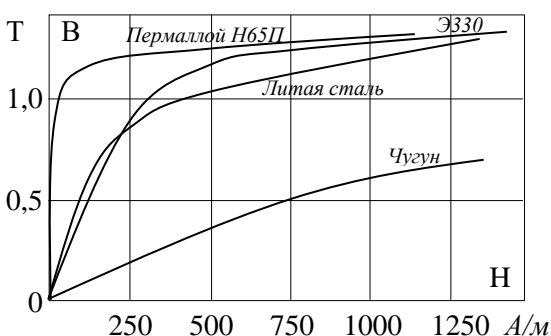


Рис. 3.10. Кривые намагничивания некоторых ферромагнитных материалов

магнитной индукции.

Стали с высоким содержанием кремния (2,8 – 4,8%) применяются при промышленной и повышенной частотах, при необходимости иметь малые потери на гистерезис и вихревые токи или высокую магнитную проницаемость в слабых и средних полях.

Основные кривые намагничивания для некоторых сортов стали даны на рис. 3.10.

Пермаллой – это сплав железа, никеля и некоторых других элементов. Эти сплавы обладают высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Они делятся на высоконикелевые (70 – 80%) и низконикелевые (40 – 50% никеля).

Листовые электротехнические стали представляют собой сплавы железа с кремнием (1 – 4%). Кремний улучшает свойства технического железа: увеличивает магнитную проницаемость, уменьшает коэрцитивную силу, уменьшает потери на гистерезис и, главное, увеличивает удельное электрическое сопротивление, а следовательно, уменьшает вихревые токи и связанные с ними потери.

Стали с низким содержанием кремния имеют низкую магнитную проницаемость, большую индукцию насыщения, большие удельные потери энергии. Эти стали применяются при постоянном и переменном токах низкой частоты, при высоких значениях

Магнитные свойства пермаллоев очень сильно зависят от содержания никеля и от технологии их изготовления.

Буква *П* в обозначении марки пермаллоя указывает на прямоугольную петлю гистерезиса (рис. 3.9, б). Прямоугольность петли характеризуют отношением остаточной индукции B_r к максимальной индукции B_M , которая (B_r / B_M) достигает значения 0,95 – 0,99.

Ферриты – это ферромагнитные материалы, получаемые керамическим методом из смеси мелких порошков окислов железа, цинка, никеля и других элементов. После прессования и обжига получают сердечники нужной формы. Ферриты имеют очень большое удельное сопротивление, следовательно, потери на вихревые токи очень малы, что позволяет применять их при высокой частоте.

Никель-цинковые ферриты, получаемые путем термического разложения солей, называются *оксидными ферромагнетиками* или *оскиферами*, по магнитным свойствам они близки к металлокерамическим ферритам.

Ферриты и оксиферы весьма разнообразны по своим магнитным свойствам, а следовательно, и по применению (магнитотвердые, магнитомягкие, с прямоугольной петлей гистерезиса и др.).

Магнитодиэлектрики – это материалы, получаемые из смеси ферромагнитного порошка с диэлектриком, например поливинилхлоридом, полиэтиленом. Смесь формуется, прессуется и запекается.

Ферриты и магнитодиэлектрики широко применяются для сердечников трансформаторов различного назначения, в автоматике и т.д.

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы характеризуются большой коэрцитивной силой, большой остаточной индукцией и поэтому используются для изготовления постоянных магнитов самого различного назначения. К этим материалам относятся: углеродистые, вольфрамовые, хромистые, кобальтовые стали, коэрцитивная сила которых 5 000 – 13 000 А/м, а остаточная индукция 0,7 – 1 Т. Они обладают ковкостью, поддаются прокатке и металлической обработке.

К магнитотвердым материалам относятся также сплавы с различным содержанием железа, алюминия, никеля, кремния, кобальта известные по названиями: *альни*, *альниси*, *льнико*, *магнико* и др., обладающие лучшими магнитными свойствами, чем указанные выше материалы. Их коэрцитивная сила 20 000 – 60 000 А/м, а остаточная индукция 0,2 – 2,25 Т. Магниты из этих сплавов изготавливаются отливкой и обрабатываются только шлифованием.

Металлокерамические магниты получают спеканием порошков и сплавов альни и альнико.

3.6. Электромагниты

Расположенный вблизи катушки с током (разомкнутый магнитопровод) стальной сердечник (рис. 3.11) намагничивается и под действием электромагнитных сил втягивается в катушку, стремясь занять положение в середине катушки, при котором магнитное поле будет наибольшим.

Электромагнитом называется устройство, состоящее из намагничивающей катушки и магнитопровода (рис. 3.12), подвижная часть которого – *якорь 2* притягивается к основной части *магнитопровода 1* с силой

$$F \approx 4 \cdot 10^5 \cdot B^2 \cdot S, \quad (3.11)$$

где F – сила, H ;

B – магнитная индукция, T ;

S – площадь сечения полюсов, m^2 .

Если магнитопровод электромагнита работает в ненасыщенном состоянии, то изменением тока можно регулировать магнитную индукцию, а следовательно, и силу электромагнита F .

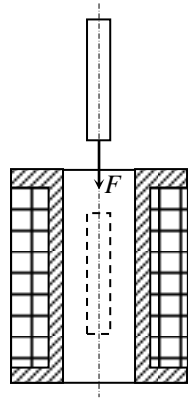


Рис. 3.11. Электромагнит с разомкнутым магнитопроводом

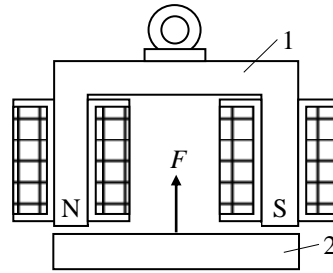


Рис. 3.12. Электромагнит с замкнутым магнитопроводом

3.7. Электромагнитная индукция

Электродвижущая сила. При движении провода с постоянной скоростью v с той же скоростью будут перемещаться свободные электроны и положительные ионы провода.

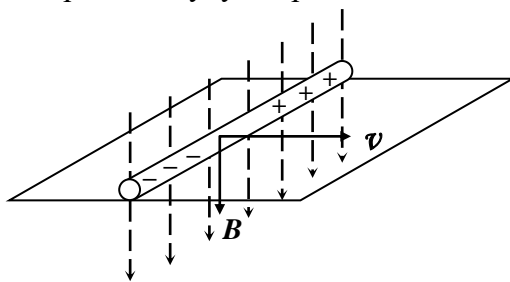


Рис. 3.13. Движение провода в магнитном поле

Если провод движется в однородном поле перпендикулярно магнитным линиям (рис. 3.13), то на каждую заряженную частицу будет действовать электромагнитная сила, направление которой определяется по правилу левой руки. Под действием этих сил электроны будут перемещаться на один из концов провода, создавая на нем отрицательный заряд, а на другом конце провода недостаток электронов создаст такой же положительный заряд. Разделение зарядов прекратится, если электромагнитные силы уравниваются электрическими силами притяжения разноименных зарядов. Так, в результате работы электромагнитных сил в проводнике возникает эдс, которую называют **эдс электромагнитной индукции**, а само явление – **электромагнитной индукцией**. Явление электромагнитной индукции было открыто в 1831 г. английский физиком М. Фарадеем.

На концах незамкнутого провода напряжение U равно эдс электромагнитной индукции E :

$$E = \mathcal{E} \cdot \ell = B \cdot \ell \cdot v.$$

Таким образом, *наведенная (индуктированная) в проводе эдс электромагнитной индукции пропорциональна магнитной индукции поля, в котором движется проводник, длине провода и скорости его движения в направлении, перпендикулярном магнитным линиям.* Это первая формулировка закона электромагнитной индукции.

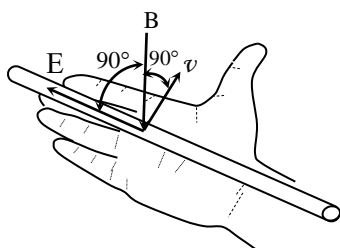


Рис. 3.14. Правило правой руки

Направление наведенной эдс определяется правилом **правой руки**: *если ладонь правой руки расположить так, чтобы магнитные линии входили в нее, отогнутый под прямым углом большой палец совместить с направлением движения проводника, то отогнутые четыре пальца укажут направление индуктированной эдс* (рис. 3.14).

При движении проводника в плоскости, расположенной под углом α к вектору магнитной индукции, эдс определяется только составляющей скорости, нормальной к вектору магнитной индукции, т.е. $v_n = v \cdot \sin \alpha$, следовательно,

$$E = B \cdot \ell \cdot v_n = B \cdot \ell \cdot v \cdot \sin \alpha. \quad (3.12)$$

При перемещении проводника со скоростью $v = \Delta b / \Delta t$ в плоскости, нормальной к магнитным линиям поля, наведенная в нем эдс

$$E = B \cdot \ell \cdot v = B \cdot \ell \cdot \Delta b / \Delta t. \quad (3.13)$$

Учитывая, что произведение B и площади $\Delta S = \ell \cdot \Delta b$ равно магнитному потоку $\Delta\Phi = B \cdot \Delta S$, пересеченному проводником за время Δt , наведенная в нем эдс

$$E = B \cdot \ell \cdot \Delta b / \Delta t = \Delta\Phi / \Delta t. \quad (3.14)$$

Следовательно, *наведенная эдс равна скорости пересечения проводником магнитного потока.*

Электродвижущая сила, наведенная в контуре. При движении контура (рис. 3.15) в неоднородном магнитном поле в плоскости, нормальной к магнитным линиям (на рис. изображены крестиками), в направлении, указанном стрелкой, в сторонах контура 1 и 2 наводятся эдс e_1 и e_2 . Направления этих эдс, найденные по правилу правой руки, показаны стрелками. В сторонах контура 3 и 4 эдс не наводятся, так как они не пересекают магнитного поля.

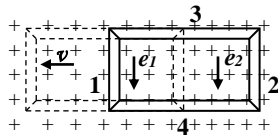


Рис. 3.15. Движение контура в магнитном поле

Обозначив $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ потоки, пересеченные соответственно сторонам контура 1 и 2 за время Δt , запишем выражения для эдс:

$$e_1 = \Delta\Phi_1 / \Delta t \quad \text{и} \quad e_2 = \Delta\Phi_2 / \Delta t.$$

В результате движения контура за время Δt пересеченный магнитный поток $\Delta\Phi_1$ окажется внутри контура, а поток $\Delta\Phi_2$ – за пределами контура (рис. 3.15). Так как положительно направление эдс связано правилом буравчика с направлением магнитного потока, то направление e_1 будет положительным, а e_2 – отрицательным. Таким образом, наведенная в контуре эдс

$$e = e_2 - e_1 = \frac{\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.15)$$

Из полученного выражения следует, что *эдс электромагнитной индукции, наведенная в контуре, равна скорости уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур.* Это вторая формулировка закона электромагнитной индукции.

Опытным путем установлено, что безразлично, происходит ли это изменение потока при движении контура в магнитном поле или в результате нарастания или убывания магнитного потока, пронизывающего неподвижный контур.

Если контур состоит из ω последовательно соединенных витков, то индуктированная эдс

$$e = -\omega \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.16)$$

Произведение числа витков и пронизывающего их магнитного потока называется **потокосцеплением**:

$$\Psi = \omega \cdot \Phi, \quad (3.17)$$

следовательно, индуктированная эдс

$$e = -\omega \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} \quad (3.18)$$

равна скорости уменьшения потокосцепления.

При движении контура в направлении, указанном на рис. 3.15, магнитный поток, пронизывающий контур, уменьшается, т.е. приращение его отрицательно $\Delta\Phi < 0$, так как $\Delta\Phi_2 > \Delta\Phi_1$. Следовательно, эдс, выраженная формулой 3.15 положительна и направлена по ходу часовой стрелки. Так же направлен ток, вызванный этой эдс. Магнитный поток, созданный этим током, имеет то же направление, что и уменьшающийся магнитный поток, в чем легко убедиться, применив правило буравчика. Следовательно, убывание потока, пронизывающего контур, вызывает появление эдс и тока, магнитный поток которого стремится противодействовать убыванию магнитного потока.

При движении контура в обратном направлении поток, пронизывающий контур, увеличивается ($\Delta\Phi > 0$) и эдс отрицательна и направлена против хода часовой стрелки. Так

же направлен вызванный ею ток. Магнитный поток, созданный этим током, направлен встречно возрастающему магнитному потоку контура. Следовательно, возрастание потока контура приводит к возникновению эдс и тока, магнитный поток которого стремится противодействовать увеличению потока контура.

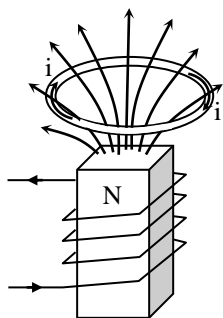


Рис. 3.16. Ток, индуцированный в кольце

Из сказанного следует: направление наведенной эдс всегда таково, что вызванный ею ток противодействует причине появления эдс. Это положение было установлено русским академиком Э.Х. Ленцем в 1833 г. и носит название **закона Ленца**.

При увеличении тока в катушке электромагнита (рис. 3.16) или при сближении кольца и электромагнита увеличивается магнитный поток, пронизывающий кольцо и в нем наводится эдс и ток. По закону Ленца направление магнитного потока, созданного током в кольце, противоположно направлению потока электромагнита, следовательно, направление индуцированного тока легко определяется по правилу буравчика.

3.8. Принцип работы электрического генератора

При движении провода в направлении вектора скорости v в плоскости,

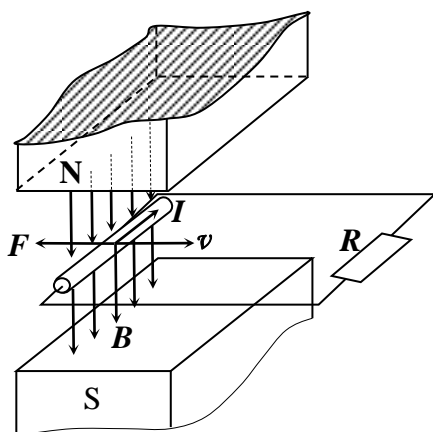


Рис. 3.17. Принцип работы электрического генератора

перпендикулярной магнитным линиям (рис. 3.17), в нем наводится эдс E . Под действием ее в замкнутой цепи с сопротивлением R проходит ток I . На провод с током в магнитном поле действует электромагнитная сила $F = I \cdot B \cdot l$, направление которой, найденное по правилу левой руки, противоположно направлению вектора скорости, следовательно, она является тормозной.

Очевидно, для движения провода необходима внешняя сила, равная и противоположная по направлению тормозной силе, т.е. необходим первичный двигатель, развивающий механическую мощность $P_M = F \cdot v$, или

$$P_M = F \cdot v = B \cdot I \cdot l \cdot v = E \cdot I = P.$$

Таким образом, полученная проводником механическая энергия при движении его в магнитном поле преобразуется в электрическую, а движущиеся под механической силы провод в магнитном поле можно рассматривать как простейший электрический генератор.

Известно, что эдс генератора

$$E = U + U_0 = I \cdot R + I \cdot r_0,$$

Следовательно, механическая мощность

$$P_M = E \cdot I = I^2 \cdot R + I^2 \cdot r_0 = U \cdot I + P_0 = P_{II} + P_0$$

Равна электрической мощности P , состоящей из мощности приемника энергии $P_{II} = U \cdot I$ и мощности потерь в генераторе $P_0 = I^2 \cdot r_0$.

3.9. Принцип работы электродвигателя

Если в проводе длиной l , расположенном в однородном поле (рис. 3.18) перпендикулярно магнитным линиям, проходит ток I от источника с напряжением U , то на него действует электромагнитная сила, значение которой определяется по формуле 3.8, а направление по правилу левой руки.

Под действием этой силы провод будет двигаться со скоростью v , совершая механическую работу, и в нем будет индуцироваться эдс, направление которой, найденное по правилу правой руки, противоположно току. Встречная эдс

$$E = B \cdot v \cdot l.$$

Если сопротивление провода r_0 , то по второму закону Кирхгофа можно записать:

$$U - E = Ir_0, \text{ или } U = E + Ir_0, \quad (3.19)$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{U - E}{r_0}. \quad (3.20)$$

Умножив обе части уравнения 3.19 на ток I , найдем электрическую мощность:

$$U \cdot I = EI + I^2 \cdot r_0 = B \cdot \ell \cdot v \cdot I + I^2 \cdot r_0 = F \cdot v + I^2 \cdot r_0.$$

Произведение $I^2 \cdot r_0$ – это мощность тепловых потерь в проводе, а $F \cdot v$ – механическая мощность.

Таким образом, полученная проводом электрическая энергия при движении его в магнитном поле преобразуется в механическую, в процесс преобразования энергии связан с наведением противо-эдс. Проводник, движущийся в магнитном поле, можно рассматривать как простейший электродвигатель.

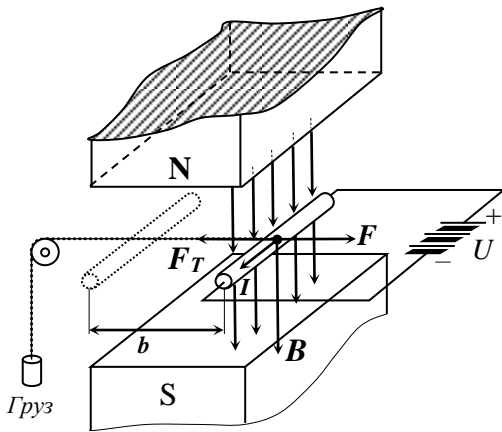


Рис. 3.18. Принцип работы электродвигателя

3.10. Энергия магнитного поля

При включении цепи, обладающей сопротивлением и индуктивностью, на постоянное напряжение ток в ней постепенно увеличивается от нуля до конечного значения:

$$I = U / r.$$

Одновременно с возрастанием тока в окружающем пространстве создается магнитное поле, в котором сосредотачивается часть энергии, израсходованной источником тока. Эта энергия проявляет себя, при коротком замыкании цепи, обеспечивая прохождение тока по тем пор, пока она не будет полностью израсходована на нагревание проводников цепи. Она также обнаруживается по силовому воздействию на провод с током, расположенный в данном поле.

Таким образом, энергия, запасенная в магнитном поле цепи определяется соотношением:

$$W_M = \frac{\Psi \cdot I}{2}. \quad (3.21)$$

3.11. Взаимная индуктивность

Явление индуктирования эдс в одной цепи (катушке) при изменении тока в другой цепи (катушке) называется **взаимной индукцией**.

Ток I_1 первой катушки (рис. 3.19) вызывает магнитный поток, часть которого Φ_{12} пронизывает витки второй катушки ω_2 , образуя потокосцепление взаимной индукции $\Psi_{12} = \omega_2 \cdot \Phi_{12}$.

Магнитный поток, а следовательно и потокосцепление пропорциональны току, т.е.

$$\Psi_{12} = M_{12} \cdot I_1 \text{ или } M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}. \quad (3.22)$$

Отношение потокосцепления одной катушки к току другой катушки, возбуждающему это потокосцепление, называется **взаимной индуктивностью** двух катушек (цепей).

Единицей измерения взаимной индуктивности в СИ служит **генри** (Гн).

Аналогичные рассуждения можно провести о влиянии второй катушки на первую, при этом установлено, что

$$M_{12} = M_{21} = M.$$

Взаимная индуктивность зависит от числа витков катушек, их размеров и формы, от взаимного расположения и магнитной проницаемости среды.

При изменении тока в первой катушке изменяется потокосцепление взаимной индукции и согласно закону электромагнитной индукции во второй катушке индуцируется эдс взаимной индукции.

Эдс взаимной индукции пропорциональна взаимной индуктивности катушек и скорости изменения тока. Рассмотрим соотношение для эдс взаимной индукции, возникающей во второй катушке:

$$e_2 = -\frac{\Delta\Psi_{21}}{\Delta t} = -M \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t}. \quad (3.23)$$

Взаимная индуктивность двух катушек связана с их индуктивностями выражением:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (3.24)$$

где k – коэффициент связи двух катушек, характеризующий степень индуктивной связи катушек, который зависит от взаимного расположения катушек: чем ближе они расположены, тем большее значение имеет коэффициент.

Явление взаимной индукции находит полезное применение в различных аппаратах и машинах, например для передачи энергии из одной электрической цепи в другую; для повышения или понижения напряжения при помощи трансформатора.

Иногда явление взаимной индукции может быть крайне не желательным, например, если параллельно воздушной линии электропередачи расположена линия, то в последней может индуцироваться эдс взаимной индукции, создающая помехи в работе линии связи.

Вопросы самоконтроля

1. Какое свойство тока называют магнитодвижущей силой?
2. Как определяется направление магнитодвижущей силы?
3. В чем заключается закон полного тока?
4. Поясните понятия абсолютной магнитной проницаемости, магнитной постоянной.
Укажите единицы измерения в СИ.
5. Поясните взаимодействие магнитного поля и прямолинейного провода; контура с током.
6. В чем заключаются явления намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков?
7. Поясните форму петли гистерезиса и физические явления, происходящие в ферромагнитном материале, на различных ее участках.
8. Поясните явление электромагнитной индукции.
9. Поясните принцип действия простейшего электрического генератора.
10. Какие физические явления лежат в основе принципа работы простейшего электродвигателя?

Тест промежуточного контроля

Тест 2а	Тест 2б
1. Укажите единицу измерения магнитной индукции 1) Генри 2) Вебер 3) Тесла 4) А/м 5) В/м	1. Укажите единицу измерения индуктивности 1) Генри 2) Вебер 3) Тесла 4) А/м 5) В/м
2. Направление какого параметра определяют по правилу правой руки? 1) направление электромагнитной силы 2) направление магнитной индукции 3) магнитодвижущей силы 4) тока	2. Направление какого параметра определяют по правилу левой руки? 1) направление электромагнитной силы 2) направление магнитной индукции 3) магнитодвижущей силы 4) тока

5) силовых линий напряженности магнитного поля	5) силовых линий напряженности магнитного поля
3. Какое явление называется намагничиванием ферромагнетика? 1) возникновение электрического тока в проводнике, перемещающемся в магнитном поле 2) запаздывание ориентации магнитных доменов относительно изменения напряженности магнитного поля 3) поворот контура с током под действием магнитного поля 4) перемещение проводника с током под действием электромагнитной силы 5) поворот магнитных доменов в направлении внешнего магнитного поля	3. Какое явление называется электромагнитной индукцией? 1) перемещение проводника с током под действием электромагнитной силы 2) запаздывание ориентации магнитных доменов относительно изменения напряженности магнитного поля 3) поворот магнитных доменов в направлении силовых линий внешнего магнитного поля 4) возникновение электрического тока в проводнике, перемещающемся в магнитном поле 5) поворот контура с током под действием магнитного поля
4. Какое явление называется остаточной намагниченностью ферромагнетика? 1) значение коэрцитивной силы 2) максимальное значение индукции 3) магнитный гистерезис 4) магнитное насыщение ферромагнетика 5) значение намагниченности при отсутствии внешнего поля	4. Какое явление называется магнитным гистерезисом? 1) перемагничивание ферромагнитного материала по действием однородного поля 2) намагничивание ферромагнитных материалов под действием внешнего поля 3) запаздывание ориентации магнитных доменов относительно изменения напряженности магнитного поля 4) значение намагниченности при отсутствии внешнего поля 5) поворот магнитных доменов в направлении силовых линий внешнего магнитного поля
5. В чем заключается сущность закона Ленца? 1) возникновение эдс самоиндукции в проводнике под действием внешнего магнитного потока 2) противодействие внешнего магнитного потока эдс самоиндукции в проводнике 3) возникновение тока в проводнике под действием эдс самоиндукции 4) определение направление индуктированного тока по правилу буравчика 5) формирование магнитного потока током в контуре при движении его в магнитном поле	5. В чем заключается сущность закона самоиндукции 1) возникновение эдс самоиндукции в проводнике под действием внешнего магнитного потока 2) определение направление индуктированного тока по правилу буравчика 3) возникновение тока в проводнике под действием эдс самоиндукции 4) пропорциональность между эдс самоиндукции в контуре и скоростью уменьшения внешнего магнитного потока 5) формирование магнитного потока током в контуре при движении его в магнитном поле

Домашнее задание

Задача 9

На каком расстоянии от оси прямого проводника находится точка A , если напряженность магнитного поля в ней равна H , а ток в проводе равен I ? Исходные данные приведены в таблице вариантов 9. Изобразите рисунок.

Таблица вариантов 9

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H, 10^{-3} \text{ А/м}$	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$I, \text{ мА}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Задача 10

Проводник длиной l с током I помещен в однородное магнитное поле под углом α к линиям магнитной индукции. Определить силу, действующую на проводник, если магнитная индукция поля равна B . Исходные данные приведены в таблице вариантов 10.

Таблица вариантов 10

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l, м$	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2
$I, А$	0,7	0,5	0,6	0,2	0,4	0,3	0,1	0,5	0,7	0,4
$\alpha, град$	45	30	60	90	45	60	30	90	45	30
$B, Т$	3	4	5	6	2	3	4	5	6	3