

В. Ф. Малишевский
А. А. Луцевич

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ



Учреждение образования
«Международный государственный экологический
институт имени А. Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

В. Ф. Малишевский, А. А. Луцевич

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Учебно-методическое пособие

Минск
«ИВЦ Минфина»
2018

УДК 537 (075.8)
ББК 22.33
М19

Рецензенты:

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики БГАТУ *В. М. Добрянский*;
кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой эко-
логических информационных систем
МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ *В. А. Иванюкович*

Малишевский, В. Ф.

М19 Основы электродинамики: учебно-методическое пособие /
В. Ф. Малишевский, А. А. Луцевич. – Минск : ИВЦ Минфина,
2018. – 143 с.
ISBN 978-985-7205-92-9.

В пособии рассматриваются теоретические вопросы электромагнетизма. Акцентировано внимание на базовых понятиях и положениях дисциплины. Решения задач изложены с элементами анализа и необходимыми пояснениями. Включены задания для самостоятельной работы, часть из которых имеет практическую или экологическую составляющие.

Предназначается студентам I–II курсов для обобщения и систематизации основных понятий и законов электромагнетизма, а также для их осознанного применения в практической деятельности.

УДК 537(075.8)
ББК 22.33

ISBN 978-985-7205-92-9

©Малишевский В. Ф., Луцевич А. А., 2018
© МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время отчетливо прослеживается понижение уровня теоретической и практической подготовки по физике у выпускников средних общеобразовательных учреждений. Это создает проблемы при ее дальнейшем изучении в высших учебных заведениях.

Учитывая и опираясь на многолетний опыт преподавания физики в высших учебных заведениях кандидатом физико-математических наук, доцентом *В. Ф. Малишевским* и кандидатом педагогических наук, доцентом *А. А. Луцевичем* был задуман и осуществлен проект под названием «Вспомним школьную физику». Его цель состояла в том, чтобы помочь студентам младших курсов усвоить основные положения, изучаемые в соответствии с учебной программой по физике для средней общеобразовательной школы. Особое внимание авторы уделяют рассмотрению теоретического материала, базовых понятий, подкрепленных практическими заданиями. Согласно названному проекту вышло учебно-методическое пособие по механике, а также издан лабораторный практикум по электромагнетизму.

В предлагаемом издании «Основы электродинамики» затронуты вопросы повышения качества знаний и умений студентов, а также проблема их адаптации к образовательному процессу в учреждении высшего образования. Особое внимание авторы уделяют изучению базовых положений электромагнетизма, что будет способствовать осознанному и глубокому усвоению предмета студентами, которые получили недостаточную подготовку в общеобразовательной школе.

Каждая глава представлена кратким перечнем программных вопросов, основными теоретическими сведениями, перечнем основных понятий, законов, формул и физических постоянных. Приводятся образцы решения типовых задач, которые сопровождаются доступными и необходимыми пояснениями, а также элементами анализа полученных результатов.

Для самоподготовки и самооценки качества усвоения теоретических знаний и уровня сформированности практических умений по применению этих знаний в конкретных ситуациях в пособии предлагается система качественных и количественных задач с практическим, в том числе с медико-биологическим и экологическим, содержанием. Материалы пособия структурированы в строгой логической последовательности.

Авторы надеются, что издание поможет студентам в усвоении программы вуза по физике, будет способствовать повышению их образовательного уровня, а также более глубокому и осмысленному изучению дисциплины.

ВВЕДЕНИЕ

Электродинамика – это наука о свойствах и закономерностях поведения особого вида материи – электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между электрически заряженными телами или частицами.

Центральным в электродинамике является понятие «электромагнитное поле».

Электромагнитное поле – один из видов существования материи, в котором и через посредство которого в пространстве и во времени осуществляются электромагнитные взаимодействия.

В общем случае электромагнитное поле в каждой точке характеризуется двумя векторными функциями координат – напряженностью электрического поля \vec{E} и индукцией магнитного поля \vec{B} :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{эл}}{q}.$$

Причем \vec{E} – это силовая характеристика электрической составляющей электромагнитного поля в данной точке; а \vec{B} – силовая характеристика магнитной составляющей электромагнитного поля в данной точке:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_{магн}}{q[\vec{v}\vec{B}]}$$

Электрическое и магнитное поля представляют собой частные случаи, различные проявления единого электромагнитного поля, зависящие от выбора системы отсчета.

1. *Электрическое поле* — вид материи, специфическим свойством которого является способность действовать на неподвижные заряды.

2. *Магнитное поле* — вид материи, специфической особенностью которого является способность действовать на движущиеся заряды.

Представим себе заряженный конденсатор и движущиеся относительно него индикаторы электромагнитного поля.

а) если они неподвижны относительно конденсатора, то будет обнаружено только электрическое поле (сила, действующая на пробный заряд);

б) если они движутся, то будет обнаружено как электрическое поле, так и магнитное поле (сила, действующая на пробный заряд и на магнитную стрелку).

В соответствии с концепцией близкодействия Дж. К. Максвелл вывел уравнения для электромагнитного поля в вакууме без учета дискретности вещества и заряда. Эти уравнения являются математическим обобщением экспериментально установленных законов электродинамики.

1. Покоящиеся и движущиеся электрические заряды создают в окружающем пространстве электрическое поле, линии, напряженности которого начинаются и заканчиваются на зарядах – закон Кулона:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}.$$

2. Магнитных зарядов в природе не существует: $\operatorname{div} \vec{B} = \vec{0}$.

3. Движущиеся заряды кроме электрического поля создают магнитное поле, линии, индукции которого являются замкнутыми кривыми, охватывающими линии тока:

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 j + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

Таким образом, магнитное поле возбуждается токами и переменными электрическими полями: закон Ампера, подправленный Максвеллом. Из 1 и 3 следует, закон сохранения электрического заряда:

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \text{ поскольку } \operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{B} = 0.$$

4. Переменное магнитное поле порождает электрическое поле, линии напряженности которого есть замкнутые кривые, охватывающие линии магнитного поля и наоборот:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ – закон электромагнитной индукции Фарадея.}$$

5. Эти уравнения нужно дополнить формулой для расчета силового действия электромагнитного поля на заряды

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}] \text{ – сила Лоренца.}$$

Отметим, что электромагнитные силы зависят не только от расстояния, но и от скорости движения зарядов в выбранной системе отсчета и не являются центральными (за исключением кулоновских сил).

Таким образом, макроскопическая электродинамика основывается на 5 постулатах: утверждения 1–4 характеризуют электрическое поле и магнитное поле, а 5 – силы, с которыми эти поля действуют на неподвижные и движущиеся заряды.

Отметим общие особенности электромагнитных явлений, вытекающие из анализа уравнений Максвелла.

1. В случае электромагнитного поля взаимодействие передается с конечной скоростью, равной скорости света в данной среде.

2. Уравнения Максвелла инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца.

Индукцию магнитного поля \vec{B} можно измерить только в той системе отсчета, в которой $\vec{E} = \vec{0}$ (либо покоящиеся постоянные магниты,

либо проводники с током). Модуль индукции численно равен модулю силы, действующей на положительный единичный заряд, пролетающий через данную точку с единичной скоростью. Напряженность электростатического поля \vec{E} имеет смысл силы действующей со стороны поля на единичный заряд, причем циркуляция $\oint \vec{E} d\vec{l} = A_{\text{поля}} = 0$ при перемещении единичного заряда по замкнутому контуру. Следовательно, поле потенциально. Безвихревой (потенциальный) характер поля означает, что линии напряженности не замкнуты, они начинаются (заканчиваются) на электрических зарядах или уходят в бесконечность.

В случае магнитного поля $\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 I \neq 0$ – поле вихревое. Вихревой характер поля означает, что линии индукции магнитного поля замкнуты, а источником магнитного поля является электрический ток.

Все процессы, происходящие в электромагнитном поле, подчиняются законам сохранения: импульса, момента импульса, электрического заряда, энергии.

РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатика – раздел электродинамики, в котором изучают взаимодействие и условия равновесия неподвижных относительно инерциальной системы отсчета электрически заряженных тел или частиц и электростатические поля, создаваемые такими зарядами.

1.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

В физике общепринято определение: «Электрический заряд есть свойство частиц вещества или тел, характеризующее их взаимосвязь с собственным и взаимодействие с внешним электромагнитным полем; имеет два вида, известные как положительный заряд (заряд протона, позитрона и др.) и отрицательный заряд (заряд электрона и др.); количественно определяется по силовому взаимодействию тел, обладающих электрическим зарядом».

Заряд как фундаментальная характеристика элементарных частиц является инвариантной физической величиной. Его значение не зависит ни от выбора системы отсчета, ни от характера движения частицы, ни от ее взаимодействия с другими частицами.

В электродинамике под зарядом понимают частицу (тело), которая обладает способностью к электромагнитному взаимодействию.

Существуют электрические заряды двух типов: положительные и отрицательные.

Заряд, который возникает *на стекле* при трении его о шелк, условно называют *положительным*, а заряд, возникающий *на эбоните* при трении о шерсть, – *отрицательным*.

Таким образом, **электрический заряд** – физическая скалярная величина, являющаяся количественной мерой электромагнитных взаимодействий частиц и тел, определяющая интенсивность их взаимодействия с внешним электромагнитным полем, а также их взаимосвязь с собственным электромагнитным полем.

В обычных условиях тела содержат одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов. Такие тела являются электрически нейтральными. *Электризация* – это явление, сопровождающееся перераспределением зарядов на телах. На теле, наэлектризовав его, можно создать избыток зарядов одного знака.

Точечный заряд – это заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь (материальная точка, которая имеет электрический заряд).

В СИ единица заряда кулон (1 Кл) является производной. 1 Кл – это заряд, который переносится через поперечное сечение проводника постоянным током 1 А за 1 с.

Основные свойства электрического заряда:

1. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные заряды притягиваются.

2. Существует элементарный электрический заряд. Носителем элементарного отрицательного заряда является *электрон*, а носителем элементарного положительного заряда – *протон*, причем модули зарядов протона и заряда электрона равны:

$$q_p = q_e = e,$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электрон – стабильная (время жизни $t > 10^{22}$ лет) элементарная частица, носитель элементарного отрицательного заряда, самая легкая из всех заряженных элементарных частиц (его масса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, что в 1836 раз меньше массы протона).

Электрон открыт в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном (J. J. Thomson), а термин «электрон», был предложен в 1891 г. Дж. Стони (G. Stoney).

3. Заряд любой заряженной частицы не может быть меньше элементарного (исключение составляют дробно заряженные кварки и X-, Y-бозоны, которые вероятно не могут существовать в свободном состоянии).

4. Электрический заряд дискретен, поскольку электрический заряд любой частицы или системы частиц является целым кратным элементарному электрическому заряду или нулевым (заряд любого тела состоит из целого числа положительных и отрицательных элементарных зарядов): $q = N_+e - N_-e$, где N_+ и N_- – числа положительных и отрицательных элементарных зарядов, соответственно.

Система тел (частиц) называется *электрически изолированной*, если между ней и внешними телами нет обмена электрически заряженными частицами.

Согласно закону сохранения электрического заряда, алгебраическая сумма электрических зарядов всех частиц электрически изолированной системы не меняется при любых процессах, происходящих в этой системе:

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const.}$$

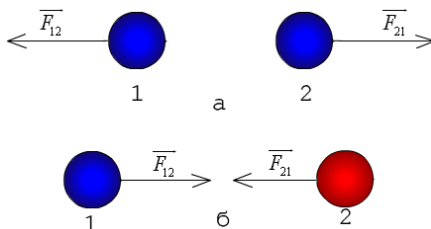


Рис. 1.1. \vec{F}_{12} – сила, действующая на заряд 1 со стороны заряда 2; \vec{F}_{21} – сила, действующая на заряд 2 со стороны заряда 1

Закон сохранения электрического заряда означает абсолютную стабильность легчайшей заряженной частицы – электрона.

1.2. Закон Кулона

Взаимодействие точечных электрических зарядов подчиняется закону Кулона, который был установлен в 1785 г. Ш. О. Кулоном (Ch. A. Coulomb).

Силы взаимодействия двух неподвижных, относительно рассматриваемой инерциальной системы отсчета, точечных зарядов q_1 и q_2 , прямо пропорциональны произведению модулей этих зарядов, обратно пропорциональны квадрату расстояния r между ними, направлены вдоль прямой, которая соединяет заряды, и являются силами отталкивания в случае одноименных зарядов, силами притяжения в случае разноименных зарядов.

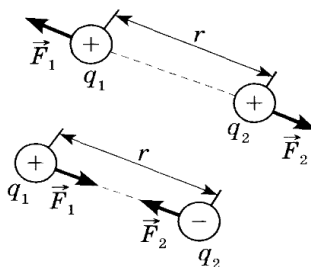


Рис. 1.2

Следовательно, $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Модуль каждой из сил взаимодействия рассчитывается по формуле:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}, \text{ где } k \text{ – размерный коэффициент.}$$

В СИ $k = \frac{Fr^2}{q_1 q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}$ – электрическая постоянная.

Величину ϵ называют *диэлектрической проницаемостью среды*. Она показывает, во сколько раз модуль силы F взаимодействия зарядов, находящихся на расстоянии r в данной среде (диэлектрике), меньше,

чем модуль силы F_0 их взаимодействия в вакууме: $\epsilon = \frac{F_0}{F}$.

1.3. Электростатическое поле.

Напряженность электростатического поля

Поле, создаваемое неподвижными относительно рассматриваемой системы отсчета электрическими зарядами, называют **электростатическим полем**.

Для исследования электростатического поля используют **пробный заряд** q_0 . Он должен быть **малым** по сравнению с зарядами, создающими поле, чтобы собственным полем не исказить исследуемое поле,

и принадлежать телу **малых** размеров, чтобы можно было исследовать поле в малых областях пространства. Для удобства пробный заряд условились считать положительным.

Напряженность \vec{E} электростатического поля в данной точке пространства – физическая векторная величина, характеризующая силовое действие поля на вносимые в него заряды, и равная отношению силы, с которой поле действует на пробный (положительный) заряд, находящийся в данной точке поля к этому заряду: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$.

Единицей напряженности в СИ является вольт на метр ($1 \frac{\text{В}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$). Поскольку выбор заряда $q_0 = 1$ Кл в качестве пробного является некорректным, то единица напряженности электростатического поля в СИ вводится на основании формулы $E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$, согласно которой $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ – это напряженность такого однородного электростатического поля, в котором разность потенциалов между двумя точками, находящимися на расстоянии 1 м, составляет 1 В.

Модуль напряженности *электростатического поля точечного заряда* на расстоянии r от него:

$$E = k \frac{q}{\epsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}.$$

Графически электростатические поля изображаются в виде линий напряженности (силовых линий). Линии напряженности, изображающие электростатическое поле, – это воображаемые направленные непрерывные линии, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают по направлению с вектором напряженности в каждой точке поля (рис. 1.3).

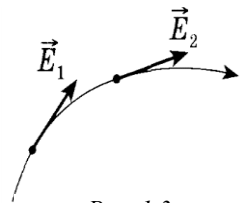


Рис. 1.3

Поскольку пробный заряд q_0 выбран положительным, то вектор напряженности поля, созданного положительным зарядом, направлен от заряда, а вектор напряженности поля, созданного отрицательным зарядом, – к заряду по радиальным линиям. Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных; уходят в бесконечность, если заряд положительный, или приходят из бесконечности, если заряд отрицательный (рис. 1.4).

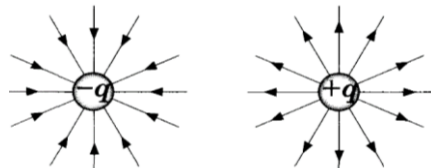


Рис. 1.4

В каждой точке поля вектор напряженности имеет числовое значение и направление.

Во всех точках поля, в которых напряженность поля $\vec{E} \neq \vec{0}$, линии напряженности непрерывны и не пересекаются (если бы они пересекались, то это означало бы, что в данной точке существуют два значения напряженности). Причем через каждую точку поля проходит, только одна линия напряженности.

Чем гуще линии напряженности, тем больше напряженность электростатического поля.

Для удобства число линий, проходящих через единичную площадку, размещенную перпендикулярно к ним, принимается равным модулю напряженности поля в том месте, где находится площадка.

Распределение линий напряженности в пространстве определяет характер поля. Поле может быть однородным и неоднородным.

Поле, во всех точках которого модуль и направление напряженности одинаковые, называют *однородным*. Линии напряженности однородного поля параллельны.

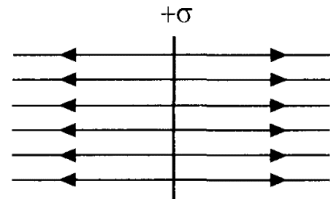


Рис. 1.5

Примером однородного электростатического поля может служить поле равномерно заряженной бесконечной плоскости (рис. 1.5). Линии напряженности \vec{E} поля, создаваемого бесконечной однородно заряженной плоскостью, перпендикулярны к этой плоскости, а ее модуль одинаков во всех точках поля.

Однородным можно считать и электростатическое поле в пространстве между обкладками плоского конденсатора (за исключением поля у их краев) (рис. 1.6).

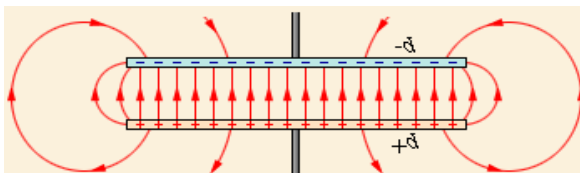


Рис. 1.6

Поле, во всех точках которого модуль и (или) направление напряженности, неодинаковые, называют *неоднородным*. Линии напряженности неоднородного поля не параллельны (рис. 1.7).

Неоднородными являются электростатические поля уединенного точечного заряда или системы точечных зарядов.

Линии напряженности электростатического поля двух точечных разноименных и одноименных (положительных) зарядов изображены на рис. 1.8.

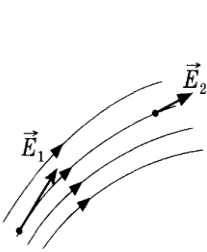


Рис. 1.7

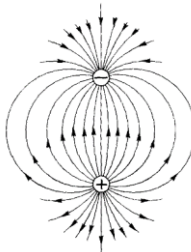


Рис. 1.8

1.4. Принцип суперпозиции электрических полей

В электродинамике **принцип суперпозиции** – является принципом, выражающим фундаментальное свойство электромагнитного поля в линейной среде. При наложении электромагнитных полей в линейной среде силы, действующие на заряды, напряженности электрических полей и индукции, магнитных полей складываются геометрически.

Согласно принципу суперпозиции, электростатические поля, созданные разными зарядами, не взаимодействуют, а накладываются друг на друга (рис. 1.9).

Если электростатическое поле создается системой зарядов, то на пробный заряд, помещенный в поле, действует сила $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$. По-

скольку $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$, а $\vec{F}_i = q\vec{E}_i$, то

напряженность поля в любой точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов системы в отдельности:

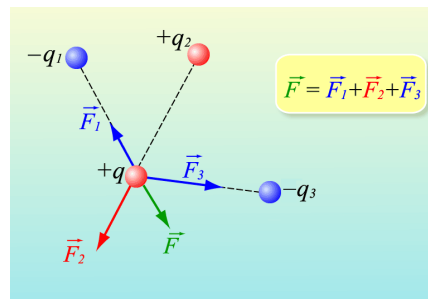


Рис. 1.9. Суперпозиция напряженностей электрических полей трех точечных зарядов

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

1.5. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле

Электростатическая индукция – перераспределение зарядов на поверхности проводника или поляризация диэлектрика под действием внешнего электростатического поля. Вследствие электростатической индукции на поверхности электрически нейтральных (в целом) тел появляется индуцированный электрический заряд.

Проводники – вещества, в которых есть свободные заряженные частицы, способные двигаться упорядоченно под действием электрического поля. Если незаряженный металлический проводник внести в электростатическое поле, напряженность которого \vec{E} , то под действием электрических сил свободные электроны начнут двигаться вдоль поля.

Они будут накапливаться на одной стороне проводника, создавая там избыточный отрицательный заряд. Недостаток электронов на другой стороне проводника приведет к возникновению на ней избыточного положительного заряда.

1. Процесс перераспределения свободных электронов в проводнике прекратится, если индуцированное поле скомпенсирует внешнее, и напряженность поля в проводнике станет равной нулю.

2. Электростатическое поле, создаваемое зарядами, находящимися на поверхности проводника, существует только вне проводника.

3. Потенциалы всех точек поверхности проводника, находящегося в электростатическом поле, одинаковы.

4. Линии напряженности электростатического поля перпендикулярны к поверхности проводника.

Диэлектрики – вещества практически не проводящие электрический ток. Термин «диэлектрик» введен М. Фарадеем для обозначения веществ, через которые проникает электростатическое поле (в отличие от металлов, экранирующих это поле).

К *диэлектрикам* относятся вещества, в которых при обычных условиях (не слишком высокие температуры, отсутствие сильных электрических полей) нет свободных носителей электрических зарядов.

Поляризация диэлектрика – появление на его поверхности некомпенсированных зарядов, приводящее к возникновению внутреннего поля связанных зарядов, напряженность $\vec{E}_{\text{вн}}$ которого противоположна напряженности \vec{E}_0 внешнего поля. Модуль напряженности E поля внутри диэлектрика, согласно принципу суперпозиции, $E = E_0 - E_{\text{вн}} < E_0$ (рис. 1.10).

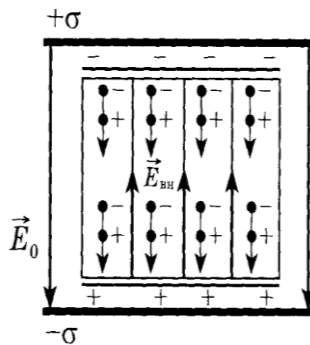


Рис. 1.10

В зависимости от строения диэлектрики можно разделить на четыре класса: полярные, неполярные, кристаллические (ионные кристаллы) и диэлектрики с самопроизвольной поляризацией, которые называют сегнетоэлектриками (BaTiO_3 , $\text{NaKCuH}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и др.).

Полярные диэлектрики – это диэлектрики, молекулы которых имеют асимметричное строение (вода, спирт и др.). В таких молекулах центры распределения положительных и отрицательных зарядов сдвинуты относительно друг друга на некоторое расстояние l . Поэтому каждую молекулу полярного диэлектрика можно рассматривать как *электрический диполь*, или систему, созданную двумя противоположными по знаку точечными зарядами, модули которых равны.

Неполярные диэлектрики – это диэлектрики, молекулы которых симметричны (парафин, бензол, азот и др.). В таких молекулах центры распределения положительных и отрицательных зарядов при отсутствии внешнего электрического поля совпадают: молекулы не имеют дипольного момента. Если поместить такой диэлектрик во внешнее поле, то электронные оболочки его молекул деформируются. Поэтому во внешнем поле молекулы превращаются в диполи. Этот вид поляризации называется *электронной поляризацией*.

К *кристаллическим диэлектрикам* относятся ионные кристаллы. Решетку ионного кристалла можно рассматривать как систему, состоящую из двух подрешеток, одна из которых создана положительными, а вторая – отрицательными ионами. Во внешнем электрическом поле обе подрешетки сдвигаются относительно друг друга, что приводит к поляризации диэлектрика.

1.6. Потенциал и разность потенциалов электростатического поля

При перемещении заряда q_0 в однородном поле сила взаимодействия между зарядом q_0 и зарядами, создающими поле \vec{E} , совершает работу (рис. 1.11).

$$A = F \Delta r \cos \alpha = q_0 E \Delta r \cos \alpha,$$

где $\Delta r \cos \alpha = (x_2 - x_1)$ – проекция перемещения заряда на направление поля. Поэтому, независимо от траектории движения да, $A = q_0 E (x_2 - x_1)$.

Система «заряд – электростатическое поле» («заряд – заряд») обладает потенциальной энергией, которую называют энергией электростатического взаимодействия. Поэтому работа сил поля равна изменению потенциальной энергии системы, взятому с противоположным знаком:

$$A = -\Delta W = -(W_2 - W_1).$$

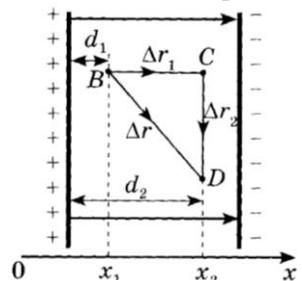


Рис. 1.11

Это утверждение справедливо и в случае неоднородного электростатического поля.

Потенциал φ – физическая скалярная величина, характеризующая энергетическое состояние поля в данной точке пространства и численно равная отношению потенциальной энергии точечного положительного (пробного) заряда q_0 , помещенного в данную точку поля, к числовому значению этого заряда:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}.$$

Если полагать, что на бесконечности поле отсутствует и его потенциал на бесконечности равен нулю, то потенциал поля можно определить следующим образом:

$$\varphi_1 = \frac{W_1}{q_0} = \frac{A_{1 \rightarrow \infty}}{q_0}.$$

Потенциал электростатического поля в данной точке численно равен работе, которую совершает сила поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки на бесконечность.

Геометрическое место точек в электростатическом поле, потенциалы которых одинаковы, называют *эквипотенциальной поверхностью*. При перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности работа сил поля равна нулю, поскольку $\Delta\varphi = 0$.

За единицу потенциала в СИ принят вольт. 1 В – это потенциал такой точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж.

Потенциал φ электростатического поля точечного заряда q на расстоянии r от него определяется соотношением $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{er} = k \frac{q}{er}$.

Если $q > 0$, то потенциал поля положительный ($\varphi > 0$). Если $q < 0$, то потенциал отрицательный ($\varphi < 0$).

Потенциал поля равномерно заряженной проводящей сферы радиусом R , заряд которой q , в точках на поверхности и вне сферы на расстоянии $r \geq R$ от ее центра, определяется по формуле $\varphi = k \frac{q}{er}$.

В точках, находящихся внутри сферы,

$$\varphi = k \frac{q}{R}.$$

Принцип суперпозиции для потенциалов: если поле создается системой зарядов, то его потенциал φ в данной точке поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов системы в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Работа, совершаемая силами неоднородного электростатического поля при перемещении заряда q_0 из точки 1 в точку 2, определяется выражением $A_{1 \rightarrow 2} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 \Delta\varphi = q_0 U$, где $(\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta\varphi = U$ – разность потенциалов (напряжение) между точками 1 и 2.

Разностью потенциалов двух точек поля называется физическая скалярная величина, равная отношению работы, которую выполняет поле при перемещении заряда из первой точки поля во вторую, к числовому значению перемещаемого заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q_0} = \frac{W_2 - W_1}{q_0} = \frac{\Delta W}{q_0}.$$

Модуль напряженности однородного электростатического поля связан с разностью потенциалов двух точек поля, потенциалы которых φ_1 и φ_2 выражаются соотношением:

$$E = \frac{U}{d_{1 \rightarrow 2}} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d_{1 \rightarrow 2}},$$

где $d_{1 \rightarrow 2}$ – расстояние между эквипотенциальными поверхностями с соответствующими потенциалами, отсчитываемое вдоль линии напряженности поля.

Если заряд q_0 перемещается в поле точечного заряда q , то работа поля:

$$A = k \frac{qq_0}{\varepsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

где r_1 и r_2 – начальное и конечное расстояния между зарядами.

Работа сил электростатического поля при движении заряда по любой замкнутой траектории ($\Delta \vec{r} = \vec{0}$) равна нулю. Поэтому электростатические силы являются консервативными, а электростатическое поле – потенциальным.

Заметим, что при движении заряженной частицы, масса которой m под действием только сил электростатического поля теорема об изменении кинетической энергии будет иметь следующий вид:

$$K_{1 \rightarrow 2} = K_2 - K_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = q\Delta\varphi = qU,$$

где v_1 и v_2 – модули скоростей частицы в начальной и конечной точках поля, соответственно; $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов между этими точками.

Электростатические поля графически можно представлять, используя эквипотенциальные поверхности.

Через каждую точку поля проходят только одна линия напряженности и одна эквипотенциальная поверхность (рис. 1.12, 1.13).

В каждой точке поля линия напряженности и эквипотенциальная поверхность взаимно перпендикулярны.

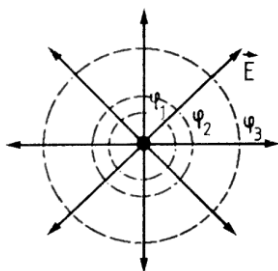


Рис. 1.12. Эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда

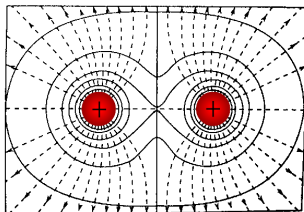


Рис. 1.13. Эквипотенциальные поверхности (сплошные) и силовые линии (пунктирные) поля двух одноименно заряженных металлических шаров

Для измерения разности электрических потенциалов (напряжения), малых электрических зарядов и сил тока (вплоть до 10^{-15} А) используют *электрометр* (рис. 1.14).

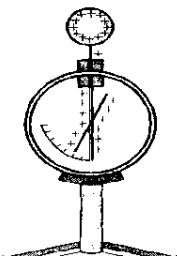


Рис. 1.14

1.7. Электростатическое поле проводящей заряженной сферы (шара)

Если проводящей сфере (шару) сообщить некоторый заряд q , то заряд будет равномерно распределяться по всей поверхности, площадь которой $S = 4\pi R^2$, где R – радиус сферы (шара). Распределенный заряд можно охарактеризовать **поверхностной плотностью заряда** σ : $\sigma = \frac{q}{S}$.

Единица поверхностной плотности заряда в СИ $[\sigma] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$.

Модуль напряженности E электростатического поля, создаваемого равномерно заряженной проводящей сферой (шаром), радиус которой R , на расстоянии r от центра сферы (шара) – $E = 0$, если $r < R$. Если точка поля находится на расстоянии $z \geq R$ от центра сферы (шара), то

$$E = k \frac{q}{\epsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}, \text{ если } r \geq R$$

График зависимости модуля напряженности поля, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), от расстояния r до центра сферы (шара), изображен на рис. 1.15.

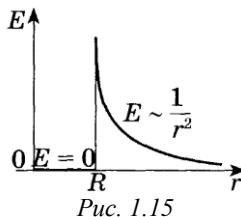


Рис. 1.15

Потенциал фполя, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), на расстоянии r от центра сферы (шара) $-\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r}$, если $r > R$.

Если $r < R$, то потенциал фполя, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), на расстоянии r от центра сферы (шара):

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon R} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon R} = \text{const.}$$

График зависимости потенциала поля, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), от расстояния r до центра сферы (шара) изображен на рис. 1.16.

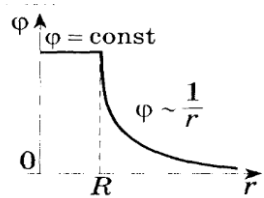


Рис. 1.16

1.8. Электростатическое поле бесконечной однородно заряженной плоскости

Линии напряженности электростатического поля, создаваемого бесконечной однородно заряженной плоскостью, перпендикулярны к этой плоскости, а ее модуль одинаков во всех точках поля:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{2\varepsilon\varepsilon_0 S},$$

где $\sigma = \frac{q}{S}$ — поверхностная плотность заряда плоскости, ε — диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится плоскость.

Для плоскости конечных размеров приведенная выше формула будет справедлива только для точек поля, расстояние от которых до плоскости значительно меньше, чем расстояния от них до краев плоскости.

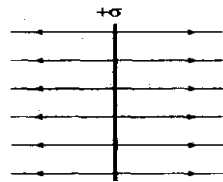


Рис. 1.17

1.9. Электроемкость уединенного проводника

Электроемкостью уединенного проводника называют физическую скалярную величину, характеризующую свойство проводника накапливать и сохранять электрический заряд и равную отношению заряда q проводника к его потенциалу φ : $C = \frac{q}{\varphi}$.

Электроемкость уединенного проводника зависит от его *формы* и *размеров*, а также от *диэлектрической проницаемости среды*, в которой он находится.

Емкость не уединенного проводника зависит от его *формы, размеров и диэлектрической проницаемости среды*, в которой он находится, а также от *наличия вблизи него других проводников*.

Емкость проводника не зависит от его удельного сопротивления, заряда, потенциала и размеров полостей внутри.

Емкость уединенного металлического шара радиусом R , находящегося в однородной изотропной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , определяют по формуле:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R.$$

1.10. Конденсаторы. Соединение конденсаторов

Взаимной емкостью системы двух проводников называют физическую скалярную величину, равную отношению заряда Δq , который переносится с одного проводника на другой, к возникающему при этом изменению разности их потенциалов $\Delta\varphi$: $C = \frac{\Delta q}{\Delta\varphi}$.

Конденсатор (лат. *condensator* – тот, кто уплотняет, сгущает) – система, состоящая из двух или более проводников, предназначенная для получения нужных значений емкости, способная накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды, емкость которой не зависит от наличия других проводников, находящихся вне этой системы. Таким образом, конденсатор – это такая система проводников, на электрическое поле которой не влияют внешние поля.

Простейший конденсатор – это система, состоящая из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники, образующие конденсатор, называются его обкладками. Обкладки конденсатора заряжены противоположными по знаку зарядами, модули которых равны.

По форме обкладок различают плоские, сферические и цилиндрические конденсаторы.

По типу используемого диэлектрика конденсаторы бывают воздушными, электролитическими, керамическими, бумажными, слюдяными и др.

Электрическая емкость (емкость) C конденсатора – физическая скалярная величина, равная отношению заряда q конденсатора к напряжению U (разности потенциалов $\Delta\varphi$) между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Зарядом конденсатора называют модуль заряда, находящегося на внутренней стороне одной из его обкладок. За единицу электрической

емкости в СИ принят один фарад (назван по имени англ. физика М. Фарадея).

1 Ф равен электрической емкости конденсатора, между обкладками которого возникает разность потенциалов $\Delta\varphi = 1$ В, при заряде на них $q = 1$ Кл. Чаще применяют дольные единицы: микрофарад ($1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6}$ Ф) и пикофарад ($1 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12}$ Ф).

Емкость плоского конденсатора с диэлектриком, заполняющим пространство между обкладками (рис. 1.18): $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$,

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, S – площадь обкладки конденсатора, d – расстояние между обкладками.

Емкость сферического конденсатора

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2}{R_1 - R_2},$$

где R_1 и R_2 радиусы внешней и внутренней обкладок конденсатора (рис. 1.19).

Модуль напряженности электростатического поля между обкладками плоского конденсатора (рис. 1.20) определяется соотношением:

$$E = E_+ + E_- = 2E_+ = 2 \frac{\sigma_+}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S},$$

где E_+ и E_- – модули напряженностей полей, создаваемых положительно и отрицательно заряженными обкладками конденсатора соответственно;

$\sigma = \frac{q}{S}$ – поверхностная плотность заряда на обкладке конденсатора; q – заряд конденсатора; S – площадь обкладки.

Вне обкладок конденсатора напряженность электростатического поля равна нулю.

Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками плоского конденсатора:

$$F = q_- \cdot E_+ = \frac{\sigma_+}{2\varepsilon\varepsilon_0} q_- = \frac{q_+ \cdot q_-}{2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Несколько конденсаторов, соединенных вместе, образуют *батарею конденсаторов*. Различают параллельное, последовательное и смешанное соединение конденсаторов.

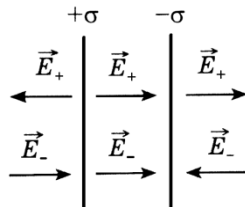


Рис. 1.18

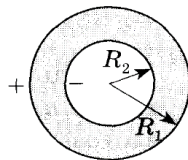


Рис. 1.19

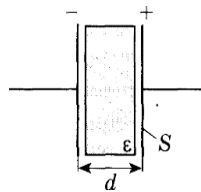


Рис. 1.20

При **последовательном соединении конденсаторов** (рис. 1.21) выполняются следующие закономерности:

1. Напряжение на зажимах батареи равно сумме напряжений на всех конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

2. Заряд батареи в этом случае равен заряду одного конденсатора, поскольку сумма зарядов внутренних обкладок равна нулю:

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n.$$

3. Емкость батареи конденсаторов при последовательном соединении определяется из соотношения:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

При **параллельном соединении конденсаторов** (рис. 1.22) выполняются следующие закономерности:

1. Напряжение на зажимах батареи равно напряжению на каждом конденсаторе: $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$.

2. Полный заряд батареи равен сумме зарядов отдельных конденсаторов: $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$.

3. Емкость батареи конденсаторов при их параллельном соединении равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

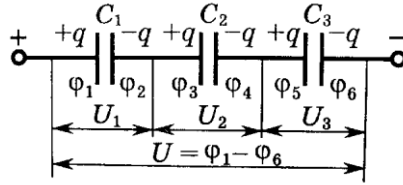


Рис. 1.21. Схема последовательного соединения конденсаторов

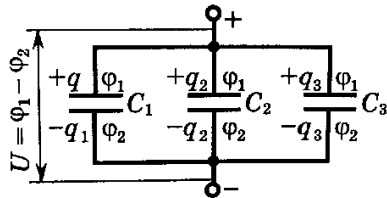


Рис. 1.22. Схема параллельного соединения конденсаторов

1.11. Энергия и плотность энергии электростатического поля

Заряженный конденсатор обладает потенциальной энергией, значение которой определяется работой (численно равно работе), совершенной сторонними силами источника ЭДС при его зарядке. Эту энергию можно рассматривать либо как потенциальную энергию взаимодействия зарядов, сконцентрированных на обкладках конденсатора, либо как энергию электростатического поля, заключенного между обкладками конденсатора:

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Энергию конденсатора можно выразить через напряженность E электростатического поля, сосредоточенного между его обкладками.

Емкость плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$, напряжение между обкладками $U = Ed$. Следовательно,

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} S d = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} V,$$

где $V = Sd$ – внутренний объем конденсатора, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 – электрическая постоянная; E – модуль напряженности электростатического поля; V – объем, в котором находится электростатическое поле.

Энергия электростатического поля уединенного заряженного проводника:

$$W = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2},$$

где q – заряд, φ – потенциал, C – емкость уединенного проводника.

Полная энергия электростатического поля системы, состоящей из n заряженных проводников, состоит из суммы энергий собственных электростатических полей этих проводников и энергии их взаимодействия:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i,$$

где q_i – заряд i -го проводника, φ_i – потенциал i -го проводника, создаваемый как полем всех остальных проводников, так и собственным полем этого проводника.

Плотность энергии электростатического поля $\omega_{эл}$ – это энергия электростатического поля, приходящаяся на единицу объема:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}.$$

Если среда изотропная, то выражение для плотности энергии $\omega = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$ справедливо не только для однородного электростатического поля, но и для электростатических полей любых конфигураций.

Если электростатическое поле создается системой, состоящей из двух зарядов, то его напряженность в любой точке пространства

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

а ее модуль $E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos \alpha$, где α – угол между векторами \vec{E}_1 и \vec{E}_2 в данной точке поля (рис. 1.23).

Плотность энергии электростатического поля, созданного системой, состоящей из двух зарядов в любой точке пространства:

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_1^2}{2} + \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_2^2}{2} + \frac{\varepsilon\varepsilon_0 2E_1 E_2 \cos \alpha}{2}.$$

Первое и второе слагаемые, входящие в последнюю формулу, определяют плотность собственных энергий электростатических полей рассматриваемых зарядов, а третье – плотность энергии, обусловленной их взаимодействием.

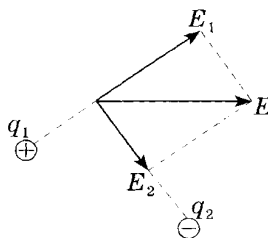


Рис. 1.23

Тренировочные упражнения для закрепления теоретического материала

1. Методические указания по решению задач

Основной задачей электростатики является определение характеристик электростатического поля данной системы зарядов, неподвижных относительно какой-либо инерциальной системы отсчета. Если характеристики поля известны, то вопрос о возможности равновесия заряженной частицы или тела в данной точке поля, как и вопрос о характере движения в поле, однозначно решается на основе законов механики с учетом сил электростатического взаимодействия.

Задачи по электростатике, в зависимости от вида выбранной физической системы и способа ее описания, условно можно разделить на следующие группы:

1. Задачи на применение законов электростатики в комбинации с кинематико-динамическим способом описания физической системы (движение или равновесие заряженных тел (частиц) в электростатическом поле). Решение задач этой группы осуществляется на основе второго закона Ньютона с учетом сил электростатического взаимодействия и законов кинематики прямолинейного или криволинейного движения. Причем, если рассматривается движение или равновесие заряда в поле точечного заряда, то сила электростатического взаимодействия определяется из закона Кулона, а во всех остальных случаях эта сила определяется через напряженность поля.

2. Задачи на применение законов электростатики в комбинации с энергетическим способом описания физической системы. Эта группа задач решается либо на основе теоремы об изменении кинетической энергии заряда с учетом работы электростатических сил, либо на основе закона сохранения полной энергии системы, включая потенциальную

энергию электростатического взаимодействия и собственные энергии электростатических полей зарядов входящих в систему.

3. Задачи, на расчет силовых или энергетических характеристик электростатического поля, одного заряда или системы зарядов. Решение осуществляется на основе принципа суперпозиции для напряженности и потенциала поля, с учетом формул для расчета напряженностей и потенциалов полей, создаваемых точечным зарядом, заряженным шаром, плоскостью и др.

4. Задачи на расчет емкости и энергии плоского конденсатора и на расчет конденсаторных цепей.

При решении задач по электростатике нужно учитывать следующее:

Земля как физический объект является источником гравитационного, электрического и магнитного полей. Воздействия этих полей, обычно не учитываются (если, только это не оговорено специально).

Идеальной моделью заряженного тела (частицы) является точечный заряд; поле, как правило, моделируется как однородное.

Замкнутые физические системы в электростатике могут быть описаны: законом сохранения электрического заряда, согласно которому

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const};$$
 законом сохранения импульса $\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{p}_{\text{кон}}$ и законом сохранения полной энергии, которая представляет собой сумму механической энергии системы как целого, ее внутренней энергии и энергии электростатического поля: $W_{\text{мех}} + U + W_{\text{эл}} = \text{const}$.

При выборе законов для описания незамкнутых физических систем необходимо выяснить характер и особенности электростатических взаимодействий объектов системы между собой и с окружением, ввести силовые и энергетические характеристики этих взаимодействий, выразить силы и (или) энергию электростатического взаимодействия через заряды, напряженности полей и потенциалы. Для вычисления силы, действующей на точечный заряд q , находящийся в точке поля с известной напряженностью \vec{E} , всегда можно применять формулу $\vec{F} = q\vec{E}$. Этой же формулой можно пользоваться для определения силы, действующей на заряд, не являющийся точечным, если поле в области пространства, занимаемой данным зарядом, является однородным.

Закон Кулона для определения силы, действующей на заряд, можно применять непосредственно только тогда, когда и все остальные заряды являются точечными.

Аналогично формула $A = qU$ дает возможность определить работу сил электростатического взаимодействия в любом поле, а формула $A = qE\Delta x$ – только в однородном.

Следует помнить, что вследствие явления электростатической индукции напряженность и потенциал поля во всех точках вокруг проводника, помещенного в поле, изменяются. Однако учесть перераспределение индуцированных зарядов в общем случае очень трудно, поэтому при решении задач этим перераспределением, как правило, пренебрегают. Кроме того, во всех задачах предполагается, что диэлектрики являются однородными и изотропными, а форма ограничивающих их поверхностей совпадает с эквипотенциальными поверхностями поля, в котором находится диэлектрик. Если в условии задачи не указана среда, в которой находятся заряды, то подразумевается вакуум или воздух ($\epsilon = 1$).

В задачах на расчет конденсаторов необходимо выяснить тип соединения (параллельное, последовательное, смешанное), установить связь между зарядами и напряжениями на конденсаторах, выразить через них емкости конденсаторов и записать формулы, соответствующие данному типу соединения. Кроме того, в некоторых задачах этой группы используется формула энергии электростатического поля конденсатора и закон сохранения электрического заряда.

2. Примеры решения задач

Задача 1. Точечные электрические заряды $q_1 = 1,3$ нКл и $q_2 = 5,2$ нКл закреплены в вакууме на расстоянии $r = 18$ см друг от друга. Определите, на каком расстоянии от заряда q_1 следует поместить точечный заряд q_0 , чтобы под действием электростатических сил он находился в состоянии равновесия. Устойчиво или неустойчиво это состояние?

Эта сумма может обратиться в нуль только при условии, что векторы, изображающие силы \vec{F}_{10} и \vec{F}_{20} , находятся на одной прямой, направлены в противоположные стороны и их модули равны: $F_{10} = F_{20}$ (рис. 1.24).

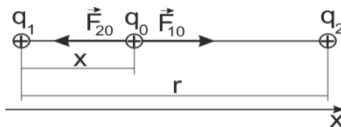


Рис. 1.24

Поскольку заряды q_1 и q_2 одноименные, то искомая точка расположена между ними на отрезке, соединяющем эти заряды. Пусть искомая точка находится на расстоянии x от первого заряда. Тогда, $F_{10} = k \frac{q_1 q_0}{x^2}$, $F_{20} = k \frac{q_2 q_0}{(r-x)^2}$, или $k \frac{q_1 q_0}{x^2} = k \frac{q_2 q_0}{(r-x)^2}$. Откуда, $\frac{(r-x)^2}{x^2} = \frac{q_2}{q_1} = 4$. Следовательно, $(r-x) = 2x$. Отсюда, $x = \frac{r}{3}$. Таким образом, $x = \frac{4l}{5} = \frac{18}{3}$ см = 6,0 см.

Дано:

$$q_1 = 1,3 \text{ нКл} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 5,2 \text{ нКл} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 18 \text{ см} = 0,18 \text{ м}$$

$x = ?$

Решение. По условию, точечный заряд q_0 находится в состоянии равновесия. Поэтому геометрическая сумма электростатических сил, характеризующих воздействие зарядов q_1 и q_2 на заряд q_0 , равна нулю: $\vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} = \vec{0}$.

Состояние равновесия неустойчиво, поскольку при малом смещении заряда q_0 с оси Ox проекция равнодействующей силы на ось Oy будет отлична от нуля и направлена от положения равновесия (рис. 1.25).

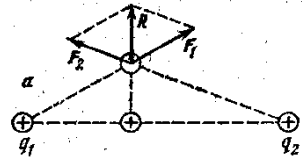


Рис. 1.25

Ответ: точечный заряд q_0 , будет находиться в равновесии в точке, расположенной на оси Ox , между зарядами, на расстоянии $x = 6,0$ см от заряда q_1 ; равновесие неустойчиво.

Задача 2. Шарик массой $m_1 = 0,50$ г, заряд которого $q_1 = 30$ нКл, подвешен в воздухе на тонкой шелковой нити. К нему на такой же нити подвешен шарик массой $m_2 = 0,50$ г, заряд которого $q_2 = -30$ нКл. Определите модуль силы натяжения каждой нити, если расстояние между центрами шариков $r = 10$ см.

Дано:

$$m_1 = 0,50 \text{ г} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,50 \text{ г} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$q_1 = 30 \text{ нКл} = 3,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -30 \text{ нКл} = -3,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 10 \text{ см} = 0,10 \text{ м}$$

$$F_{\text{нат}} = ? \quad F_{\text{нат}} = ?$$

Решение. Систему отсчета свяжем с лабораторией, и будем считать ее инерциальной. По отношению к рассматриваемой системе отсчета оба шарика находятся в состоянии равновесия. Векторы, изображающие силы, которые действуют на каждый из шариков, показаны на рис. 1.26. Все силы направлены по вертикали.

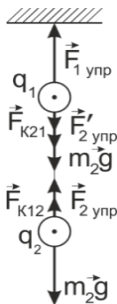


Рис. 1.26

Таким образом, для верхнего шарика $\vec{F}_{1\text{упр}} + \vec{F}_{2\text{упр}}^i + m_1\vec{g} + \vec{F}_{K12} = \vec{0}$.

Для нижнего шарика $\vec{F}_{2\text{упр}} + m_2\vec{g} + \vec{F}_{K21} = \vec{0}$.

Следовательно, $F_{2\text{упр}} = m_2g - F_{K21} = m_2g - k \frac{q_1 q_2}{r^2}$.

Если учесть, что в соответствии с третьим законом

Ньютона $\vec{F}'_2 = -\vec{F}_2$ и $\vec{F}_{K12} = -\vec{F}_{K21}$, получим $\vec{F}_{1\text{упр}} + m_1\vec{g} + \vec{F}_{K12} + \vec{F}_{K21} + m_2\vec{g} = \vec{0}$.

Откуда, $F_{1\text{упр}} = (m_1 + m_2)g$.

Модуль силы натяжения каждой из нитей равен модулю соответствующей силы упругости:

$F_{1\text{упр}} = F_{1\text{нат}}$ и $F_{2\text{упр}} = F_{2\text{нат}}$. Тогда модуль силы натяжения верхней нити $F_{1\text{нат}} = (m_1 + m_2)g$.

Модуль силы натяжения нижней нити

$$F_{2\text{нат}} = m_2 g - F_{\text{Кл}21} = m_2 g - k \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Численно: $F_{1\text{нат}} = 10$ мН, $F_{2\text{нат}} = 4,2$ мН.

Ответ: $F_{1\text{нат}} = 10$ мН; $F_{2\text{нат}} = 4,2$ мН.

Задача 3. Небольшая шайба, заряд которой $q = 4,5$ нКл, движется в однородном электростатическом поле с постоянной скоростью вдоль линий напряженности по горизонтальной неэлектропроводной поверхности. Определите модуль силы сопротивления движению шайбы, если модуль напряженности поля $E = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Дано:

$$q = 4,5 \text{ нКл} = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$E = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

$$F_c = ?$$

Решение. Систему отсчета свяжем с лабораторией, и будем считать ее инерциальной. Ось Ox направим горизонтально вдоль скорости шайбы, ось Oy – перпендикулярно к поверхности. В качестве физической системы рассмотрим заряженную шайбу, которую примем за материальную точку, а ее заряд будем считать точечным.

Если пренебречь взаимодействием шайбы с воздухом, электрическим и магнитным полями Земли, то на шайбу воздействуют гравитационное поле Земли, поверхность и однородное электростатическое поле. Этим воздействиям соответствуют: сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции поверхности \vec{N} , сила сопротивления движению шайбы \vec{F}_c и электростатическая сила $\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}$.

Принимая во внимание, что по отношению к рассматриваемой системе отсчета выделенная нами физическая система движется с постоянной скоростью, т. е. ее ускорение $\vec{a} = \vec{0}$, получим:

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_c + q\vec{E} = \vec{0}.$$

Проецируя векторы изображающие силы на оси Ox и Oy (рис. 1.27), получим:

$$\begin{cases} qE - F_c = 0, \\ N - mg = 0. \end{cases}$$

Откуда модуль силы сопротивления $F_c = qE$.

$$F_c = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 200 \text{ В} = 9,0 \cdot 10^{-7} \text{ Н} = 0,90 \text{ мкН}.$$

Ответ: $F_c = 0,90$ мкН.

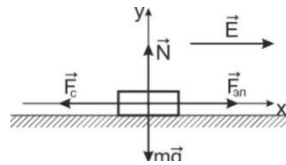


Рис. 1.27

Задача 4. На двух проводящих концентрических сферах, радиусы которых $R_1 = 18$ см и $R_2 = 56$ см, находятся заряды $q_1 = q_2 = 4,7$ нКл.

Определите модуль напряженности электростатического поля в точке B (рис. 1.28), на расстоянии $r = 30$ см от общего центра обеих сфер.

Дано:

$$R_1 = 18 \text{ см} = 0,18 \text{ м}$$

$$R_2 = 56 \text{ см} = 0,56 \text{ м}$$

$$r = 30 \text{ см} = 0,30 \text{ м}$$

$$q_1 = q_2 = 4,7 \text{ нКл} = 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$E_B = ?$$

Решение. Для нахождения модуля напряженности электростатического поля в точке B воспользуемся принципом суперпозиции полей, согласно которому $\vec{E}_B = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

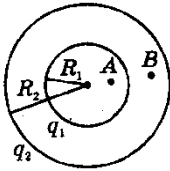


Рис. 1.28

По условию задачи система зарядов является сферически симметричной, поэтому модуль напряженности электростатического поля в любой точке поля, равноудаленной от их общего центра, будет одинаковым. Модуль напряженности электростатического поля, создаваемого внутренней сферой, заряд которой q_1 равномерно распределен по ее поверхности, в точках вне сферы на расстоянии r от ее центра,

определим по формуле $E_1 = \frac{kq_1}{r^2}$, поскольку $r > R_1$. Модуль напряженности электростатического поля, создаваемого внешней сферой, заряд которой q_2 на расстоянии r от ее центра $E_2 = 0$, поскольку $r < R_2$. Следовательно, $E_B = E_1 = \frac{kq_1}{r^2}$.

$$\text{Тогда } E_B = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(0,30 \text{ м})^2} = 4,7 \cdot 10^2 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 0,47 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

$$\text{Ответ: } E_B = 0,47 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

Задача 5. Три шарика, заряженные равными одноименными зарядами q_0 каждый, расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной a . Определите напряженность и потенциал электростатического поля в центре треугольника.

Решение. Систему отсчета свяжем с лабораторией, и будем считать ее инерциальной. Предположим, что шарики покоятся относительно выбранной системы отсчета.

В качестве физической системы будем рассматривать три заряженных шарика. Если пренебречь перераспределением зарядов шариков вследствие электростатической индукции, то их заряды можно считать точечными. Для определения напряженности и потенциала поля, созданного этими зарядами в центре треугольника, воспользуемся принципом суперпозиции, в соответствии с которым $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$.

Сделаем схематический рисунок и укажем на нем направления векторов \vec{E}_1, \vec{E}_2 и \vec{E}_3 (считая заряды шариков положительными). Начало координат выберем в центре треугольника, ось Oy направим вертикально вниз, ось Ox – горизонтально (рис. 1.29). Проецируя векторные величины на оси координат, получим:

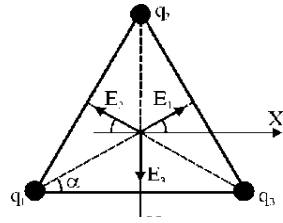


Рис. 1.29

$$\begin{cases} E_x = E_1 \cos \alpha - E_2 \cos \alpha, \\ E_y = E_3 - E_1 \sin \alpha - E_2 \sin \alpha. \end{cases}$$

По условию задачи $q_1 = q_2 = q_3 = q_0$. Расстояние между центром треугольника и его вершинами $r_0 = \frac{a}{2 \cos \alpha}$. Поэтому $E_1 = E_2 = E_3 = k \frac{q_0}{\epsilon r_0^2} = k \frac{4q_0}{\epsilon a^2} \cos^2 \alpha$. Откуда, $E_x = 0$, $E_y = 4k \frac{q_0}{\epsilon a^2} \cos^2 \alpha (1 - 2 \sin \alpha)$. Так как $\alpha = \frac{\pi}{6}$, то $\sin \alpha = \frac{1}{2}$, то есть $E_y = 0$. Следовательно, напряженность электростатического поля в центре треугольника $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 0$.

Если нулевой уровень потенциала выбрать в бесконечности, то потенциалы полей каждого заряда в центре треугольника

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = k \frac{2q_0}{\epsilon a} \cos \alpha.$$

По принципу суперпозиции потенциал поля в центре треугольника $\varphi = 6k \frac{q_0}{\epsilon a} \cos \alpha$. Принимая во внимание, что $\cos \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$, окончательно получим $\varphi = \frac{3\sqrt{3}kq_0}{\epsilon a}$.

Ответ: $E = 0, \varphi = \frac{3\sqrt{3}kq_0}{\epsilon a}$.

Самостоятельно покажите, что если два шарика заряжены положительно, а заряд третьего отрицательный, то

$$E = 6k \frac{4q_0}{\epsilon a^2}, \varphi = \frac{\sqrt{3}kq_0}{\epsilon a}.$$

Задача 6. Электрон разгоняется из состояния покоя в однородном электростатическом поле напряженностью $3 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$. Определите модуль скорости электрона через $\Delta t = 1,0 \cdot 10^{-9}$ с после начала движения.

Решение. Систему отсчета свяжем с лабораторией и будем считать ее инерциальной. В качестве физической системы рассмотрим электрон. Если пренебречь его взаимодействием с гравитационным, электрическим и магнитным полями Земли, а также предположить, что электрон движется в вакууме, то разгон происходит только под

действием ускоряющего поля. Поэтому движение электрона можно описать вторым законом Ньютона и кинематическими законами равноускоренного прямолинейного движения, согласно которым

$$m\vec{a} = e\vec{E}, \vec{s} = \frac{\vec{a}t^2}{2}, \vec{v} = \vec{a}t.$$

Если спроецировать векторы, изображающие физические величины, на ось Ox , направленную в сторону движения (т. е. против поля), выбрав начало координат в точке, из которой электрон начал двигаться, получим: $ma = eE$, $x = \frac{at^2}{2}$, $v = at$. Таким образом, модуль искомой скорости $v = \frac{eE}{m}t$.

Подставив числовые значения заряда и массы электрона, а также значения E и t , получим $v = 5,3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, что больше скорости света в вакууме.

Так как ни в какой системе отсчета тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме, то полученное значение скорости не может быть ответом задачи. Причиной ошибки явилось неявно сделанное предположение о том, что движение электрона может быть описано законами классической механики.

Изменение импульса тела равно импульсу силы, действующей на него, то есть $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$, не только в классической, но и в релятивистской механике. Причем при релятивистских скоростях движения импульс тела: $\vec{p} = \gamma m\vec{v}$, где $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

С учетом этого, применительно к ситуации, описанной в задаче, теорему об изменении импульса можно записать в виде: $\Delta(\gamma m\vec{v}) = e\vec{E}\Delta t$. Принимая во внимание, что $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{v}$, $\Delta t = t - t_0 = t$ (поскольку в момент времени $t_0 = 0$ скорость $v_0 = 0$), получим:

$$\frac{mv}{t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = eE. \text{ Таким образом, искомая скорость электрона: } v = \frac{eEt}{m} \cdot \left(1 + \frac{e^2 E^2 t^2}{m^2 c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Подставив числовые значения физических величин, получим: $v = 2,6 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: $v = 2,6 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 7. В начальный момент времени протон и α -частица покоятся в вакууме на достаточно большом расстоянии друг от друга. На какое минимальное расстояние смогут сблизиться частицы, если

одной из них сообщить скорость, модуль которой $v = 1 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, направленную вдоль прямой, соединяющей эти частицы?

Решение. В качестве физической системы рассмотрим протон и α -частицу, считая их материальными точками, а их заряды точечными. Земля как источник гравитационного, электрического и магнитного полей, по отношению к выделенной физической системе является внешним телом. Однако если воздействием этих полей на каждую из частиц пренебречь, то систему «протон – α -частица» можно считать замкнутой и описать законом сохранения импульса и законом сохранения энергии. Если учесть, что скорости движения частиц малы по сравнению со скоростью света, то можно воспользоваться классическими выражениями для энергии и импульса, а также законами электростатики при описании электрических взаимодействий частиц.

В качестве начального состояния физической системы рассмотрим состояние в момент времени, когда одной из частиц, например, протону сообщили скорость v_0 . В качестве конечного выберем состояние, когда расстояние между частицами минимально.

Так как полный импульс рассматриваемой физической системы и ее полная энергия, представляющая собой сумму кинетических энергий частиц и энергии их электростатического взаимодействия, сохраняются, то $\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{p}_{\text{кон}}$ и $W_{\text{нач}} = W_{\text{кон}}$. Принимая во внимание, что $\vec{p}_{\text{нач}} = m_1 \vec{v}_0$, где m_1 – масса протона, \vec{v}_0 – сообщенная ему скорость; $\vec{p}_{\text{кон}} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$, где m_2 – масса α -частицы, а \vec{v}_1 и \vec{v}_2 – скорости протона и α -частицы в момент времени, соответствующий минимальному расстоянию между ними, получим: $m_1 \vec{v}_0 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$.

Так как заряды протона и α -частицы q_1 и q_2 – одноименные, то сила кулоновского взаимодействия между ними будет тормозить протон и разгонять α -частицу. Поэтому расстояние между частицами будет уменьшаться до тех пор, пока скорость протона будет больше скорости α -частицы (протон догоняет α -частицу). Расстояние будет наименьшим в момент времени, когда скорости частиц окажутся одинаковыми, а затем снова начнет возрастать. Следовательно, в конечном состоянии $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 = \vec{v}$. С учетом того, что векторы скорости направлены в одну сторону, закон сохранения импульса можно записать в скалярной форме: $m_1 v_0 = m_1 v + m_2 v$.

В начальный момент времени протон и α -частица находятся на большом расстоянии друг от друга, причем α -частица неподвижна, поэтому энергия электростатического взаимодействия частиц и кинетическая энергия α -частицы равны нулю. Следовательно, энергия системы в начальном состоянии: $W_{\text{нач}} = \frac{m_1 v_0^2}{2}$.

Энергия системы в конечном состоянии:

$$W_{\text{кон}} = \frac{m_1 v^2}{2} + \frac{m_2 v^2}{2} + k \frac{q_1 q_2}{l_0}, \text{ где } k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2, \quad l_0 -$$

искомое минимальное расстояние между частицами. Следовательно,

$$\frac{m_1 v_0^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2)}{2} v^2 + k \frac{q_1 q_2}{l_0}.$$

Таким образом, законы сохранения для рассматриваемой физической системы имеют вид:

$$\begin{cases} m_1 v_0 = (m_1 + m_2) v, \\ \frac{m_1 v_0^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2)}{2} v^2 + k \frac{q_1 q_2}{l_0}. \end{cases}$$

$$\text{Откуда, } l_0 = 2k \frac{q_1 q_2 (m_1 + m_2)}{m_1 m_2 v_0^2}.$$

Принимая во внимание, что $m_2 = 4m_1$, $q_1 = e$, $q_2 = 2e$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, последнюю формулу можно записать в виде

$$l_0 = \frac{5ke^2}{m_1 v_0^2}.$$

Подставив числовые значения физических величин в расчетную формулу получим $l_0 = 0,69$ мкм.

Покажите самостоятельно, что если скорость \vec{v}_1 сообщить не протону, а α -частице, то минимальное расстояние между частицами будет тем же.

Ответ: $l_0 = 0,69$ мкм.

Задача 8. Проводящий шар, радиус которого $R_1 = 5,0$ см, окружен плотно прилегающим к нему концентрическим слоем однородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6,0$ и наружным радиусом $R_2 = 10$ см (рис. 1.30). Определите емкость шара с учетом окружающего его слоя диэлектрика.

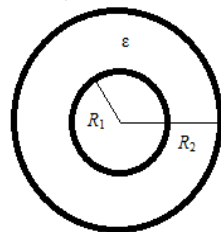


Рис. 1.30

Дано:

$$R_1 = 5,0 \text{ см} = 0,050 \text{ м}$$

$$R_2 = 10 \text{ см} = 0,10 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 6,0$$

$$C - ?$$

Решение. Если в систему добавить тонкую сферическую проводящую оболочку радиуса R_2 , прилегающую к наружной поверхности слоя диэлектрика, получим сферический конденсатор, состоящий из двух сфер, пространство между которыми заполнено диэлектриком и проводящую сферу радиусом R_2 , соединенные последовательно.

Тогда $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$, где $C_1 = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$ и $C_2 = 4\pi\epsilon_0 R_2$. Следо-

вательно, $C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2}{R_1(\epsilon - 1) + R_2}$.

$$C = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}} \cdot 6,0 \cdot 0,10 \text{ м} \cdot 0,050 \text{ м}}{0,050 \text{ м} \cdot 5,0 + 0,10 \text{ м}} = 9,5 \cdot 10^{-12} \Phi = 9,5 \text{ пФ}.$$

Ответ: $C = 9,5 \text{ пФ}$.

Задача 9. Плоский воздушный конденсатор, расстояние между обкладками которого $d = 4,0 \text{ мм}$, заряжен до напряжения $U_0 = 36 \text{ В}$ и отключен от источника тока. В конденсатор, параллельно обкладкам, внесли металлическую пластинку толщиной $d_1 = 2,0 \text{ мм}$, площадь которой равна площади обкладок. Определите напряжение между обкладками конденсатора.

Дано:

$$d = 4,0 \text{ мм}$$

$$U_0 = 36 \text{ В}$$

$$d_1 = 2,0 \text{ мм}$$

$$\epsilon = 1,0$$

$$U = ?$$

Решение. Электроемкость воздушного конденсатора до введения металлической пластинки $C_0 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d}$. После введения пластинки получилось два конденсатора, соединенных последовательно, емкости которых

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d_1} \text{ и } C_2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d - (d_2 + d_1)}.$$

$$\text{Тогда, } \frac{1}{C} = \frac{d_1}{\epsilon \epsilon_0 S} + \frac{d - (d_1 + d_2)}{\epsilon \epsilon_0 S} = \frac{d - d_1}{\epsilon \epsilon_0 S}.$$

Электроемкость конденсатора после введения пластинки $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d - d_1}$. По условию, после зарядки конденсатор отключен от источ-

ника тока. Следовательно, его заряд остается неизменным. Поэтому $q_0 = q$ или $C_0 U_0 = C U$. Откуда,

$$U = \frac{C_0 U_0}{C} = \frac{(d - d_1) U_0}{d}. U = \frac{(4,0 - 2,0) \text{ мм} \cdot 36 \text{ В}}{4,0 \text{ мм}} = 18 \text{ В}.$$

Ответ: $U = 18 \text{ В}$.

Задача 10. Батарея из четырех конденсаторов, электроемкости которых $C_1=1,0$ мкФ, $C_2=2,0$ мкФ, $C_3=3,0$ мкФ, $C_4=4,0$ мкФ, подключена к источнику постоянного тока (рис. 1.31). Определите напряжение на конденсаторе электроемкостью C_3 , если напряжение на полюсах источника $U = 10$ В.

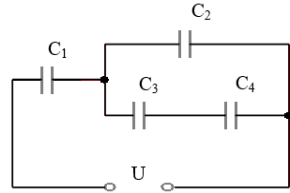


Рис. 1.31

Дано:

$$C_1 = 1,0 \text{ мкФ} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 2,0 \text{ мкФ} = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_3 = 3,0 \text{ мкФ} = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_4 = 4,0 \text{ мкФ} = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U = 10 \text{ В}$$

$$U_3 = ?$$

Решение. Конденсаторы C_3 и C_4 соединены последовательно, поэтому

$$C_{3-4} = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = \frac{12}{7} \text{ мкФ}.$$

Конденсатор C_2 соединен с C_{3-4} параллельно, следовательно,

$$C_{2,3,4} = C_2 + C_{3-4} = C_2 + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4}, \quad \text{тогда}$$

$$C_{2,3,4} = \left(2,0 + \frac{12}{7} \right) \text{ мкФ} = \frac{26}{7} \text{ мкФ}.$$

$$\text{Электроемкость батареи конденсаторов } C_B = \frac{C_1 \cdot C_{234}}{C_1 + C_{234}}.$$

$$\text{Тогда, } C_B = \frac{1,0 \text{ мкФ} \cdot \frac{26}{7} \text{ мкФ}}{\left(1,0 + \frac{26}{7} \right) \text{ мкФ}} = \frac{26}{33} \text{ мкФ. Заряд батареи, } q_B = C_B U.$$

$$\text{Численно } q_B = \frac{26}{33} \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 10 \text{ В} = \frac{26}{33} \cdot 10^{-5} \text{ Кл}.$$

$$\text{Поскольку } q_B = q_{2,3,4}, \text{ то } C_B U = C_{2,3,4} U_{3-4}.$$

$$\text{Отсюда, } U_{3-4} = \frac{C_B U}{C_{234}} = \frac{\frac{26}{33} \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 10 \text{ В}}{\frac{26}{7} \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = \frac{70}{33} \text{ В} = 2,12 \text{ В. Если учесть, что}$$

$$q_3 = q_4 \text{ и } U_{3-4} = U_3 + U_4, \text{ получим } C_3 U_3 = C_4 U_4 \text{ или } U_4 = \frac{C_3 U_3}{C_4} = \frac{3}{4} U_3.$$

$$\text{Тогда, } U_{3-4} = U_3 + \frac{3}{4} U_3 = \frac{7}{4} U_3, \text{ откуда } U_3 = \frac{4}{7} U_{3-4} = 1,2 \text{ В}.$$

Ответ: $U_3 = 1,2$ В.

Задача 11. Между обкладками плоского конденсатора, электроемкость которого $C_1 = 40$ пФ, а заряд $q = 10$ мкКл, находится стеклянная пластинка с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5,0$. Определите минимальную работу, которую необходимо совершить, чтобы удалить

пластинку из конденсатора. Трением между удаляемой пластинкой и обкладками конденсатора можно пренебречь.

Дано:

$$C_1 = 4,0 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$q = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$$

$$\varepsilon_1 = 5,0$$

$$\varepsilon_2 = 1,0$$

$$A = ?$$

Решение. Минимальное значение работы, совершенной внешней силой, равно изменению энергии электростатического поля конденсатора: $A = \Delta W = W_2 - W_1 = \frac{q^2}{2C_2} - \frac{q^2}{2C_1}$.

Поскольку $C_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S}{d_1}$, $C_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{d}$, то $C_2 = \frac{\varepsilon_2 C_1}{\varepsilon_1}$.

$$\text{Откуда, } A = \Delta W = W_2 - W_1 = \frac{q^2 \varepsilon_1}{2C_2 \varepsilon_2} - \frac{q^2}{2C_1}$$

Следовательно, $A = \frac{q^2}{2C_1} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$. Численно $A = 5,0 \text{ Дж}$.

Ответ: $A = 5,0 \text{ Дж}$.

Задача 12. Уединенный проводник электроемкостью $C_1 = 10 \text{ пФ}$ заряжен до потенциала $\varphi_1 = 2,0 \text{ кВ}$, а уединенный проводник электроемкостью $C_2 = 20 \text{ пФ}$ – до потенциала $\varphi_2 = 5,0 \text{ кВ}$. Определите энергию, выделившуюся при соединении этих проводников тонкой проволокой, электроемкостью которой можно пренебречь.

Дано:

$$C_1 = 10 \text{ пФ} = 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$\varphi_1 = 2,0 \text{ кВ} = 2,0 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$C_2 = 20 \text{ пФ} = 2,0 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$\varphi_2 = 5,0 \text{ кВ} = 5,0 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\Delta W = ?$$

Решение. Энергия, выделившаяся при соединении заряженных проводников, равна изменению энергии электростатического поля этих проводников, то есть $\Delta W = W_2 - W_1$. Энергия системы проводников до соединения $W_1 = \frac{C_1 \varphi_1^2}{2} + \frac{C_2 \varphi_2^2}{2}$.

Общий заряд системы до соединения проводников $q_1 + q_2 = C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2$. После соединения в результате перераспределения электронов между проводниками их потенциалы станут одинаковыми. Поэтому общий заряд после соединения проводников:

$$q'_1 + q'_2 = C_1 \varphi + C_2 \varphi$$

Согласно закону сохранения электрического заряда,

$q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$ или $C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2 = C_1 \varphi + C_2 \varphi = (C_1 + C_2) \varphi$. Следовательно, $\varphi = \frac{C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2}{C_1 + C_2}$.

Энергия системы после соединения $W_2 = \frac{(C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2)^2}{2(C_1 + C_2)}$. Тогда,

$$\Delta W = \frac{(C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2)^2}{2(C_1 + C_2)} - \left(\frac{C_1 \varphi_1^2}{2} + \frac{C_2 \varphi_2^2}{2} \right) = - \frac{C_1 C_2 (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2(C_1 + C_2)}$$

Таким образом, $\Delta W = -\frac{C_1 C_2 (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2(C_1 + C_2)}$.

Численно: $\Delta W = -3,0 \cdot 10^{-5} \text{ Дж} = -30 \text{ мкДж}$.

Ответ: $W = -30 \text{ мкДж}$.

3. Задания для самостоятельной работы

3.1. Вопросы по теме «Электростатика»

1. Чем объясняется электризация тел при соприкосновении? Почему при электризации заряжаются оба тела? К какому виду взаимодействий относится взаимодействие заряженных тел?

2. Почему шарик, висящий на шелковой нити, после соприкосновения с наэлектризованным телом отталкивается от него?

3. Каким образом можно наэлектризовать трением металлический стержень?

4. Почему незаряженная легкая гильза, изготовленная из проводящей фольги и подвешенная на тонкой шелковой нити, всегда сначала притягивается к наэлектризованной палочке независимо от знака ее заряда, а после соприкосновения с палочкой отталкивается от нее?

5. Назовите существенные признаки понятия «электрический заряд». Может ли существовать электрический заряд без материального носителя?

6. Какие два вида электрических зарядов существуют в природе? Как взаимодействуют а) одноименно, б) разноименно заряженные частицы?

7. В чем проявляется свойство дискретности электрического заряда? Какой заряд называют элементарным?

8. Сформулируйте закон Кулона. Запишите формулу и разъясните физический смысл всех величин, входящих в формулу.

9. Назовите физические величины, которые характеризуют любую точку электростатического поля.

10. Запишите формулы для расчета напряженности, электростатического поля: а) точечного заряда, б) равномерно заряженной проводящей сферы в некоторой точке?

11. Укажите направление напряженности электростатического поля, образованного двумя зарядами q_1 и q_2 (рис. 1.32) в точке А. Как направлена сила, действующая со стороны поля на а) положительный б) отрицательный заряд, помещенный в эту точку поля?

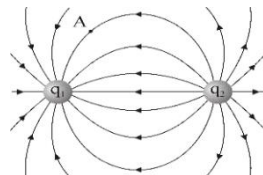


Рис. 1.32

12. Могут ли линии напряженности электростатического поля пересекаться? Почему?

13. Может ли потенциальная энергия заряда в электростатическом поле оставаться неизменной, если этот заряд перемещается под действием сил поля?

14. Чему равна разность потенциалов между точкой на поверхности заряженной проводящей сферы и любой точкой, расположенной внутри нее?

15. Заряд первого проводника меньше заряда второго проводника, а его потенциал больше потенциала второго проводника. Как будут перемещаться электрические заряды, если эти проводники соединить тонкой длинной проволокой?

16. Двум уединенным металлическим шарам с разными диаметрами сообщили одинаковые отрицательные заряды. Будут ли одинаковыми потенциалы шаров? Что произойдет, если шары соединить длинным тонким проводником?

17. При сближении двух одноименных зарядов потенциальная энергия взаимодействия системы зарядов увеличивается. Откуда берется эта энергия?

18. На рис. 1.33 и 1.34 изображены линии напряженности электростатического поля. В какой из трех точек 1, 2, 3 потенциал поля больше?

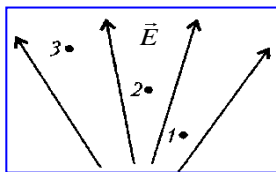


Рис. 1.33

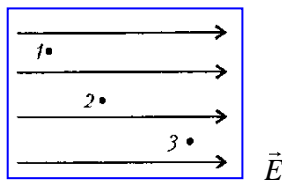


Рис. 1.34

19. Запишите формулы для расчета потенциала электростатического поля а) точечного заряда; б) равномерно заряженной проводящей сферы?

20. Как определить а) напряженность, б) потенциал электростатического поля, созданного несколькими точечными зарядами?

21. Запишите формулы для расчета работы совершенной электростатическими силами при перемещении электрического заряда в а) однородном, б) неоднородном поле.

22. Докажите, что работа, которую совершают электростатические силы при перемещении заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории, равна нулю.

23. Свободная заряженная частица перемещается под действием сил электростатического поля на некоторое расстояние. В какой точке траектории потенциал поля выше, если заряд частицы а) положительный, б) отрицательный?

24. Почему весь статический заряд, сообщенный проводнику, распределен по его поверхности?

25. Чему равна сила, действующая на точечный заряд, если его поместить а) в центр равномерно заряженной проводящей сферы; б) в любую другую точку внутри этой сферы?

26. Почему деревянная линейка притягивается к наэлектризованной палочке?

27. Как действует внешнее электростатическое поле на молекулы а) полярных, б) неполярных диэлектриков?

28. Каков механизм поляризации а) полярных, б) неполярных диэлектриков?

29. Какой проводник можно считать уединенным? Что называют электрической емкостью уединенного проводника? Обладает ли электроемкостью незаряженный проводник?

30. Два проводника имеют одинаковые форму и размеры, но один из них сплошной, а другой полый. Докажите, что электроемкости обоих проводников, находящихся в одинаковых условиях, совпадают.

31. Запишите формулу для расчета электроемкости шара.

32. Что представляет собой плоский конденсатор? Запишите формулу для расчета электроемкости плоского конденсатора.

33. Можно ли, проанализировав формулу для расчета электроемкости $C = \frac{q}{U}$, утверждать, что электроемкость конденсатора зависит от сообщенных его обкладкам зарядов и возникающего между ними напряжения?

34. Изменится ли электроемкость конденсатора, если модуль заряда каждой обкладки увеличить в два раза?

35. Изменится ли разность потенциалов между обкладками заряженного конденсатора, если одну из них заземлить?

36. Запишите формулу для расчета общей электроемкости параллельно соединенных конденсаторов?

37. Запишите формулу для расчета общей электроемкости последовательно соединенных конденсаторов?

38. Сформулируйте определение основной единицы электроемкости в СИ?

39. По каким формулам можно рассчитать энергию поля заряженного конденсатора?

40. Как изменится энергия поля заряженного конденсатора при увеличении расстояния между его обкладками, если: а) конденсатор отключен от источника тока; б) конденсатор подключен к источнику тока?

3.2. Задачи для самопроверки

1. Определите суммарный заряд всех электронов молекул водорода, который занимает объем $V = 1 \text{ см}^3$ при температуре $t = 27^\circ\text{C}$ и давлении $p = 100 \text{ кПа}$.

2. Два заряженных шарика одинакового размера, находящиеся в вакууме на расстоянии $r = 2,0 \text{ м}$ друг от друга, отталкиваются с силой, модуль которой $F_1 = 1,0 \text{ Н}$. Определите модуль силы F_2 взаимодействия шариков, после того как их привели в соприкосновение, а затем поместили на прежнем расстоянии в керосин. Заряд первого шарика до соприкосновения $q_1 = 38 \text{ мКл}$.

3. Шарик массой $m = 0,32 \text{ г}$, заряд которого $q_1 = 10 \text{ нКл}$, подвешен на нити. На каком расстоянии под ним надо поместить точечный заряд $q_2 = 1,7 \text{ нКл}$, чтобы сила натяжения нити уменьшилась вдвое?

4. Внутри гладкой диэлектрической сферы диаметром d находится шарик массой m и зарядом q_0 . Какой заряд q нужно поместить в нижнюю точку сферы для того, чтобы шарик удерживался в ее верхней точке?

5. Над бесконечной равномерно заряженной горизонтальной плоскостью, поверхностная плотность электрического заряда которой $\sigma = 91 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2}$, находится в состоянии равновесия медный шарик с зарядом $q_1 = 4 \text{ мКл}$. Определите радиус R шарика.

6. Шарик массой m и зарядом q подвешен на нити, другой конец которой закреплен. После того, как систему поместили в однородное вертикальное электростатическое поле, модуль силы натяжения нити остался таким же, как и при отсутствии поля. Определите напряженность поля.

7. Шар диаметром $d = 1 \text{ см}$, содержащий $N = 1 \cdot 10^{13}$ избыточных электронов, помещен в масло и находится там во взвешенном состоянии. Определите напряженность \vec{E}_0 внешнего электростатического поля, в котором находится сосуд с маслом, если плотность масла $\rho_1 = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, плотность вещества шара $\rho_2 = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

8. Рядом с вертикальной металлической пластиной площадью $S = 314 \text{ см}^2$, находящейся в воздухе, подвешен на тонкой шелковой нити маленький шарик, массой $m = 0,04 \text{ г}$, несущий заряд $q = 3,3 \text{ нКл}$. Какой заряд q_1 надо сообщить пластине, чтобы нить с шариком отклонилась на угол $\alpha = 45^\circ$ от вертикали?

9. На дне широкого сосуда, заполненного жидким диэлектриком с плотностью ρ_0 и диэлектрической проницаемостью ϵ , закреплена металлическая пластинка, имеющая форму диска радиуса r . Вторая такая

же пластинка толщиной h_0 , плотность вещества которой ρ ($\rho < \rho_0$), плавает над первой. Обеим пластинкам сообщили разноименные заряды, модули которых равны. Определите значения этих зарядов, если вторая пластинка полностью погрузилась в диэлектрик.

10. Маленький тяжелый шарик массой m , имеющий заряд q , находится в однородном горизонтальном электростатическом поле, напряженность которого \vec{E} . Шарик сообщают скорость \vec{v}_0 , направленную вертикально вверх. На каком расстоянии L от точки бросания скорость шарика будет минимальной?

11. Узкий пучок протонов попадает в однородное электростатическое поле напряженностью $9 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, линии напряженности которого перпендикулярны направлению движения пучка. Определите длину участка мишени, на который попадают протоны, если модули их скоростей заключены в пределах от $v_1 = 1 \frac{\text{Мм}}{\text{с}}$ до $v_2 = 10 \frac{\text{Мм}}{\text{с}}$. Мишень расположена параллельно полю на расстоянии $L = 20$ см от точки входа пучка в поле.

12. Между плоскими параллельными электродами длиной l каждый, расстояние между которыми d , создано электростатическое поле. В пространство между ними вблизи от нижнего электрода влетает электрон со скоростью \vec{v}_0 под углом α к нему. При каких значениях напряженности поля между электродами электрон пролетит, не задев ни один из электродов?

13. Два груза массами m_1 и m_2 и зарядами q_1 и q_2 связаны длинной нитью, переброшенной через неподвижный блок достаточно большого диаметра. Вся система находится в вертикальном однородном электростатическом поле, напряженность которого \vec{E} направлена вертикально вниз. Определите ускорения грузов и силу натяжения нити.

14. Два точечных заряда $q_1 = 25$ нКл и $q_2 = -9$ нКл находятся на расстоянии 6 см друг от друга. Определите положение точки, в которой напряженность поля, созданного этими зарядами, равна нулю. Чему равен потенциал поля в этой точке?

15. Ромб состоит из двух правильных треугольников. В вершинах острых углов ромба находятся одноименные заряды $q_1 = q_2 = 2,5$ нКл, а в вершине тупого угла заряд $q_3 = 0,27$ мкКл. Определите напряженность и потенциал поля в четвертой вершине.

16. Точечный заряд q находится на высоте h над проводящей плоскостью. Определите, какую работу нужно совершить против сил поля, чтобы удалить этот заряд в бесконечность.

17. Отрицательно заряженная частица движется в однородном электростатическом поле так, что эквипотенциальную поверхность с потенциалом ϕ_1 она пересекает под углом α к нормали,

а эквипотенциальную поверхность с потенциалом φ_2 – под углом β . Найдите связь между углами, если известно, что в точке с нулевым потенциалом скорость частицы равна нулю.

18. Две частицы, массы которых m_1 и m_2 , заряженные одноименными зарядами q_1 и q_2 , движутся вдоль одной прямой навстречу друг другу. В момент, когда расстояние между частицами равно r_1 , они имеют скорости \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . Определите минимальное расстояние L_{\min} между частицами.

19. По наклонной плоскости, составляющей угол α с горизонтом, без трения соскальзывает с высоты h небольшая шайба массой m , отрицательный заряд которой « $-q$ ». В точке пересечения вертикали, проведенной через начальное положение шайбы, с основанием плоскости находится заряд « $+q$ ». Определите скорость \vec{v} шайбы у основания наклонной плоскости.

20. Внутри плоского, с горизонтально расположенными обкладками, конденсатора с напряженностью поля \vec{E} равномерно вращается шарик массой m с зарядом q , подвешенный на легкой нити длиной l . Нить образует угол α с вертикалью. Определите работу A , совершенную при раскручивании шарика.

21. Заряженный шарик покоится между обкладками горизонтального плоского конденсатора на расстоянии $l = 0,8$ см от нижней обкладки при напряжении между обкладками $U_1 = 300$ В. Через какой промежуток времени Δt шарик упадет на нижнюю обкладку, если напряжение мгновенно уменьшить до $U_2 = 240$ В?

22. Между вертикально расположенными на расстоянии d друг от друга обкладками незаряженного плоского конденсатора на одинаковом расстоянии от них равномерно со скоростью, модуль которой v_0 , падает пылинка массой m и зарядом q . Через сколько времени пылинка достигнет одной из обкладок, если конденсатор подключить к источнику, напряжение на полюсах которого U ?

23. Электрон, модуль скорости которого $v_0 = 2 \frac{M_m}{c}$, влетает в пространство между обкладками плоского конденсатора, расстояние между которыми $d = 5$ см, через отверстие в нижней обкладке и движется вдоль линии напряженности электростатического поля. Определите напряжение U между обкладками конденсатора и время Δt движения электрона, если известно, что, пройдя расстояние $l = 3$ см, он остановился.

24. Электромметр, заряженный до потенциала $\varphi_1 = 1,2$ кВ, соединили тонкой проволокой с конденсатором емкостью $C = \frac{1}{9}$ нФ, после чего его потенциал уменьшился до значения $\varphi_2 = 400$ В. Определите емкость C_1 электромметра.

30. К воздушному конденсатору, заряженному до напряжения $U_0 = 500$ В, подключен параллельно второй конденсатор таких же размеров и формы, пространство между обкладками которого заполнено диэлектриком. Определите диэлектрическую проницаемость вещества диэлектрика, если напряжение на зажимах батареи конденсаторов $U = 70$ В.

31. Определите значение емкости C_x в схеме (рис. 1.35), если емкость батареи конденсаторов одинакова как при замкнутом, так и при разомкнутом ключе K .

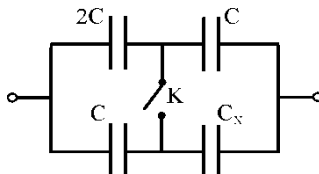


Рис. 1.35

32. Между обкладками плоского конденсатора емкостью C и зарядом q находится пластинка, диэлектрическая проницаемость вещества которой равна ϵ . Какую работу A надо совершить, чтобы вытащить пластинку из конденсатора?

33. Батарея из n последовательно соединенных конденсаторов, емкостью C каждый, подключена к источнику напряжения на полюсах которого U . Определите изменение энергии батареи и работу, совершенную источником при пробое одного из конденсаторов.

34. Заряды на обкладках двух конденсаторов q_1 и q_2 соответственно. При каком условии параллельное соединение этих конденсаторов не приводит к потерям энергии, если емкости конденсаторов C_1 и C_2 ?

35. Емкость счетчика Гейгера $C = 16$ пФ. Сколько пар ионов образовалось при разряде в счетчике, если присоединенный к нему вольтметр показал уменьшение напряжения на $\Delta U = 1$ В?

36. В импульсной фотовспышке лампа питается от конденсатора емкостью $C = 800$ мкФ, напряжение на котором $U_0 = 300$ В. Определите энергию W и среднюю мощность P вспышки, если продолжительность разряда $\Delta t = 2,4$ мс.

37. В установке Токамак Т-10 мощность в импульсе электрического разряда $P = 0,3$ МВт, продолжительность импульса $\Delta t = 1$ с. Какой емкостью должна обладать батарея конденсаторов при напряжении $U = 20$ кВ, которая используется в качестве накопителя энергии?

38. Шар радиусом $r_1 = 10$ см, заряженный до потенциала $\phi_0 = 2,7$ кВ, соединили длинным тонким проводником с незаряженным шаром радиусом $r_2 = 5$ см. Какое количество теплоты Q выделилось при этом в соединительном проводнике, если его сопротивление $R = 10$ Ом?

39. В результате импульсного разряда конденсатора емкостью $C = 18$ мкФ через разреженный гелий происходит нагревание газа. Определите изменение температуры гелия, если напряжение на конден-

саторе $U = 30$ кВ, а газ занимает объем $V = 10$ л при давлении $p = 1,0 \cdot 10^{-2}$ мм. рт. ст.

40. Плоский конденсатор с расстоянием между обкладками d , заполнен веществом с диэлектрической проницаемостью ϵ и удельным сопротивлением ρ , подключен к источнику тока с ЭДС \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r . Определите напряженность поля между обкладками конденсатора, если его емкость C .

РАЗДЕЛ 2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

2.1. Электропроводность. Сила тока

Микроскопическая природа постоянного тока состоит в направленном перемещении дискретных заряженных частиц, но макроскопически он может рассматриваться как непрерывный процесс, аналогичный течению жидкости или газа. Чаще всего постоянный ток обусловлен движением зарядов в токопроводящих средах. Свободными носителями электрических зарядов в металлах и в полупроводниках являются электроны проводимости; в электролитах – положительные и отрицательные ионы, возникающие в результате электролитической диссоциации молекул; в газах – электроны и ионы, которые возникают под действием внешнего ионизатора или электрического поля, существующего в газе.

Стационарный поток заряженных частиц в вакууме также представляет собой постоянный ток.

Электропроводностью (электрической проводимостью, проводимостью) называют свойство вещества пропускать электрический ток под действием электрического поля, а также физическую величину, количественно характеризующую это свойство.

Классическая теория электропроводности вещества, а также его электрических, магнитных и оптических свойств основана на представлении о том, что всякое вещество состоит из дискретных частиц, обладающих отрицательным или положительным электрическим зарядом, связанных друг с другом силами электромагнитного взаимодействия.

Электрический ток – направленное (упорядоченное) движение любых свободных носителей электрических зарядов. За направление электрического тока условно принято направление движения положительно заряженных частиц.

Направленное движение свободных носителей зарядов в любых проводниках возникает под действием сил внешнего электрического поля.

Электронная проводимость – электрическая проводимость вещества, обусловленная движением электронов проводимости (свободных электронов слабо связанных с ионами). В металлах электроны проводимости есть всегда, в полупроводниках они появляются только при некотором возбуждении (достаточно высокой температуре, освещении, внедрении примесей и т. п.).

Теоретическую модель, описывающую поведение электронов проводимости в электронных проводниках (металлы и полупроводники), без учета кулоновского взаимодействия между электронами, называют моделью **электронного газа**.

Сила тока I – физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность направленного движения свободных носителей электри-

ческих зарядов и равная отношению заряда, проходящего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени.

Среднее значение силы тока в проводнике $\langle I \rangle = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, где Δq – заряд, переносимый через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt .

Мгновенное значение силы тока равно первой производной от заряда переносимого через поперечное сечение проводника по ни: $I = q'(t)$.

Если сила тока и его направление не изменяются с течением времени, то такой ток называют *постоянным*. В этом случае $I = \frac{q}{t}$, где q – заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за любой промежуток времени t .

Основной единицей силы тока в СИ является ампер (по имени французского физика А. М. Ампера). 1 А равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии $d = 1$ м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной $l = 1$ м силу взаимодействия, модуль которой $F = 2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Если средняя скорость упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике $\langle v \rangle$, а их концентрация n , то сила тока $I = q_0 n \langle v \rangle S$, где $q_0 = e$ – элементарный электрический заряд; S – площадь поперечного сечения проводника (рис. 2.1).

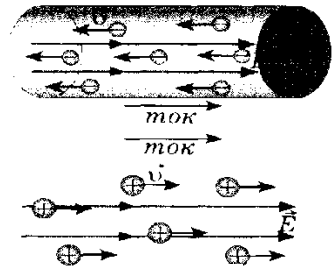


Рис. 2.1

2.2. Сопротивление

Электрическое сопротивление – структурный элемент электрической цепи (резистор, реостат и др.), включаемый в цепь для ограничения или регулирования силы тока. Наличие активного электрического сопротивления приводит к диссипации (рассеянию) электрической энергии и ее преобразованию во внутреннюю энергию.

Резистор (англ. resistor, от лат. resisto – сопротивляюсь) – структурный элемент электрической цепи, основное функциональное назначение которого оказывать известное (номинальное) сопротивление электрическому току с целью регулирования силы тока и напряжения.

Реостат (греч. rheos – течение, поток и statos – стоящий, неподвижный) – структурный элемент электрической цепи, предназначенный для регулирования и ограничения силы тока или напряжения в электрической цепи, основная часть которого – проводящий элемент с переменным сопротивлением (рис. 2.2). Значение сопротивления реостата может изменяться плавно или ступенчато. Для изменения силы тока и напряжения в небольших пре-

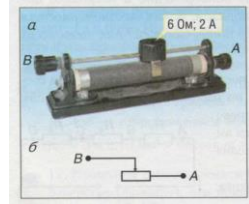


Рис. 2.2

делах реостат включается в электрическую цепь последовательно с источником тока. Для регулировки силы тока и напряжения в широком диапазоне применяется потенциометрическое включение реостата.

Электрическое сопротивление R (активное или омическое сопротивление) – физическая скалярная величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току (упорядоченному движению свободных носителей зарядов).

За основную единицу сопротивления в СИ принимается ом. 1 Ом – это сопротивление проводника, по которому проходит ток силой 1 А при напряжении между его концами 1 В.

Величина, обратная сопротивлению R , называется проводимостью G :

$$G = \frac{1}{R}.$$

Единица проводимости в СИ: $[G] = 1 \text{ Ом}^{-1} = 1 \text{ См}$ (сименс)

Сопротивление R любого проводника зависит от его размеров, формы и вещества, из которого изготовлен проводник.

Сопротивление однородного проводника длиной l и площадью поперечного сечения S , вычисляется по формуле: $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление вещества проводника.

Величина $\sigma = \frac{1}{\rho}$, обратная удельному сопротивлению ρ , называется удельной проводимостью вещества проводника.

Основной единицей удельного сопротивления в СИ является ом·метр. 1 Ом·м – это удельное сопротивление вещества, при котором изготовленный из него проводник, длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м² (например, куб с ребром 1 м), имеет сопротивление 1 Ом.

Единица удельной проводимости в СИ: $[\sigma] = 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} = 1 \frac{\text{См}}{\text{м}}$.

Удельное сопротивление любого проводника определяется концентрацией свободных носителей зарядов и интенсивностью их рассеивания (в металлах и полупроводниках – это рассеивание свободных электронов

на ионах кристаллической решетки, которые совершают тепловые колебания на примесях и дефектах кристаллической структуры).

Удельное сопротивление проводника зависит не только от свойств вещества, из которого он изготовлен, но и от его температуры (рис. 2.3).

Температурная зависимость удельного сопротивления любого проводника обусловлена двумя факторами:

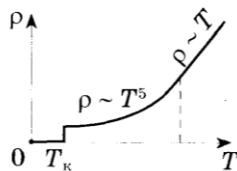


Рис. 2.3

а) возрастанием интенсивности рассеивания свободных носителей зарядов при повышении температуры;

б) изменением концентрации свободных носителей зарядов при нагревании проводника (рассеивание на примесях от температуры не зависит).

Температурный коэффициент сопротивления вещества α – равен относительному изменению удельного сопротивления при повышении температуры на $\Delta T = 1$ К:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T},$$

где $\langle \alpha \rangle$ – среднее значение температурного коэффициента сопротивления в интервале температур ΔT .

В общем случае $\alpha = \alpha(T)$, поэтому при определенной температуре T его значение составляет $\alpha = \frac{\rho'(T)}{\rho(T)}$.

Удельное сопротивление ρ_2 практически любого металлического проводника при температуре T_2 связано с его удельным сопротивлением ρ_1 при температуре T_1 соотношением

$$\rho_2 = \rho_1 (1 + \alpha \Delta T),$$

где $\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 \Delta T}$ – температурный коэффициент сопротивления,

$\Delta T = T_2 - T_1$ при условии, что $T_1 > 140$ К.

Если $T_1 = T_0 = 273$ К = 0 °С, то $\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - T_0)) = \rho_0 (1 + \alpha t)$.

Если учесть, что $R = \rho \frac{l}{S}$ и, кроме этого, пренебречь изменением

размеров металлического проводника при нагревании, то его сопротивления при температурах T_2 и T_1 связаны соотношением

$$R_2 = R_1 (1 + \alpha \Delta T).$$

При низких температурах наблюдается отступление от линейной зависимости удельного сопротивления от температуры.

У многих металлов при температурах в пределах до 10 К сопротивление скачком обращается в нуль. Это явление получило название сверхпроводимости (высокотемпературные сверхпроводники). В настоящее время получены сверхпроводящие материалы, температура сверхпроводящего перехода которых превышает 100 К.

2.3. Закон Ома для однородного участка цепи

Электрическая цепь—совокупность устройств, предназначенных для прохождения в них электрического тока соединенных проводниками.

В состав электрической цепи обязательно входят источники тока, потребители (например, резистор, электромотор и др.) и провода, соединяющие источники с потребителями. Кроме того, используются электроизмерительные приборы (амперметр, вольтметр и др.) и приборы управления (ключ и др.)

Однородным участком цепи называется участок цепи, не содержащий источников тока, то есть такой участок цепи, на котором не действуют сторонние силы.

Согласно закону Ома (G. Ohm, 1826 г) для однородного участка цепи, установленному экспериментально, **сила тока I в однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению U на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению R этого участка:**

$$I = \frac{U}{R}.$$

Поэтому график зависимости силы тока от напряжения (вольтамперная характеристика) для данного проводника представляет собой прямую линию (рис. 2.4). Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс обратно пропорционален сопротивлению проводника: $tg \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R}$.

Величину $U=IR$ часто называют падением напряжения на участке цепи.

Для однородного участка цепи падение напряжения всегда совпадает с напряжением на нем.

В металлах и электролитах зависимость силы тока от напряжения подчиняется закону Ома. Для газов и полупроводников этот закон в общем случае не выполняется.

Основные физические характеристики однородного участка электрической цепи постоянного тока приведены в табл. 2.1.

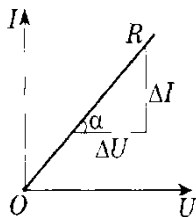


Рис. 2.4

Таблица 2.1

Основные физические характеристики электрической цепи

	Факты, свойства, характеристики	Физические закономерности
1	Основной экспериментальный закон, устанавливающий взаимосвязь силы тока (I) в проводнике с количественной характеристикой внешнего воздействия на проводник (U)	Сила тока I на однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению U на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению R этого участка: $I = \frac{U}{R}$
2	Взаимосвязь силы тока в проводнике с характеристиками свободных носителей зарядов	Сила тока I в проводнике, площадь поперечного сечения которого S , прямо пропорциональна концентрации n свободных носителей зарядов и средней скорости $\langle v \rangle$ их упорядоченного движения: $I = q_0 n \langle v \rangle S$
3	Взаимосвязь силы тока со свойствами вещества проводника	Значение удельного сопротивления вещества определяется концентрацией свободных носителей зарядов и их рассеянием на ионах кристаллической решетки, на примесях и дефектах структуры
4	Зависимость удельного сопротивления металлических проводников от температуры	Концентрация n свободных электронов в металлах постоянна, а интенсивность их рассеяния на ионах, совершающих тепловые колебания, и дефектах структуры растет с ростом температуры: $\rho_2 = \rho_1 (1 + \alpha \Delta T)$, где ρ_1 и ρ_2 – удельное сопротивление при температурах T_1 и T_2 , α – температурный коэффициент сопротивления, $[\alpha] = 1 \text{ K}^{-1}$, ΔT – изменение температуры проводника
5	Единицы физических величин в СИ	U – электрическое напряжение на концах проводника, $[U] = 1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$; I – сила тока в проводнике, $[I] = 1 \text{ А}$; R – электрическое сопротивление проводника, $[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом}$; ρ – удельное электрическое сопротивление вещества проводника $[\rho] = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

2.4. Соединение проводников

Последовательным называют соединение проводников, при котором конец первого проводника соединяется с началом второго, конец второго – с началом третьего и т. д.

Параллельным называют соединение проводников, при котором начала всех проводников, соединены в один узел, а концы – в другой (узел – точка электрической цепи, в которой соединяется более двух проводников).

- При последовательном соединении проводников их общее сопротивление будет больше наибольшего из сопротивлений.
- При последовательном соединении проводников, сопротивления которых одинаковые, их общее сопротивление $R = nR_1$, где R_1 – сопротивление одного проводника.
- При параллельном соединении проводников их общее сопротивление будет меньше наименьшего из сопротивлений.
- Для двух параллельно соединенных проводников их общее сопротивление:

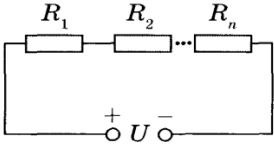
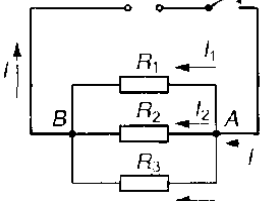
$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

- При параллельном соединении проводников, сопротивления которых одинаковые, их общее сопротивление $R = \frac{R_1}{n}$, где R_1 – сопротивление одного проводника.

Информация об основных закономерностях последовательного и параллельного соединений проводников приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Схемы и основные закономерности последовательного и параллельного соединения проводников

	Соединение	
	Последовательное	Параллельное
Схема		
Сохраняющаяся величина	$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n = const$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n = const$
Суммируемые величины	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$
Общее сопротивление участка цепи	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

Шунт. Для измерения силы тока в цепи используют амперметры. Амперметр включается в измеряемую цепь последовательно с нагрузкой. Чтобы амперметр не влиял на силу тока в цепи, его сопротивление R_0 должно быть во много раз меньше сопротивления R этой цепи.

Условие $R_0 \ll R$ называют *условием точного измерения силы тока* в цепи. Каждый амперметр рассчитан на определенную максимальную силу тока I_A . Чтобы измерить силу тока, большую чем I_A , параллельно катушке прибора подключают проводник (шунт) с небольшим сопротивлением $R_{ш}$ (рис. 2.5). По-

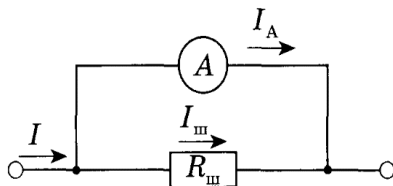


Рис. 2.5

скольку катушка гальванометра и шунт соединены параллельно, то $R_0 = \frac{R_{ш}R_A}{R_{ш}+R_A} < R_A$.

Малое сопротивление шунта, во-первых, защищает амперметр от больших токов, во-вторых, способствует выполнению условия точного измерения силы тока в цепи.

Используя закономерности параллельного соединения, можно получить

$$\left. \begin{aligned} I &= I_A + I_{ш} \\ I_A R_A &= I_{ш} R_{ш} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I = I_A \left(1 + \frac{R_A}{R_{ш}} \right).$$

Если сила тока I в цепи в n раз больше чем I_A , то есть $I = nI_A$, то сопротивление шунта можно рассчитать по формуле $R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}$.

Добавочное сопротивление. Для измерения напряжения используют вольтметры. Вольтметр включается в электрическую цепь параллельно тому участку цепи, напряжение на котором измеряется. Каждый вольтметр рассчитан на определенное максимальное напряжение. Для расширения предела измерения к вольтметру последовательно подключают сопротивление, которое называют *добавочным сопротивлением* (рис. 2.6).

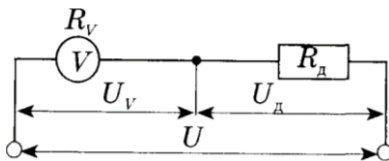


Рис. 2.6

Используя закономерности последовательного соединения, можно получить:

$$\left. \begin{aligned} U &= U_V + U_д \\ \frac{U_V}{R_V} &= \frac{U_д}{R_д} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U = U_V \left(1 + \frac{R_д}{R_V} \right).$$

Если напряжение на участке цепи U в n раз превышает напряжение U_0 , на которое рассчитан вольтметр, то есть $U = U_0 n$, дополнительное сопротивление R_d можно рассчитать по формуле $R_d = R_V(n - 1)$.

2.5. Электродвижущая сила (ЭДС). Закон Ома для неоднородного участка цепи. Закон Ома для полной цепи

Электродвижущая сила (ЭДС) – феноменологическая характеристика источника тока, введенная Г. Омом для цепей постоянного тока. По определению, которое принадлежит Г. Кирхгофу, ЭДС – это физическая скалярная величина, равная отношению работы $A_{ст}$ «сторонних» сил при перемещении электрического положительного заряда q вдоль замкнутого проводящего контура к значению этого заряда.

ЭДС является интегральной характеристикой замкнутого контура с током, и в общем случае нельзя строго указать место ее «приложения».

Однако довольно часто ЭДС можно считать приблизительно локализованной в определенных устройствах или элементах цепи, называемых *источниками тока* (рис. 2.7). В таких случаях ее принято считать энергетической характеристикой источника тока, которая численно равна работе, выполняемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутой цепи. Таким образом,

ЭДС источника тока $\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$, где

$A_{ст}$ – работа сторонних сил по перемещению положительного заряда q вдоль замкнутой цепи (сторонние силы совершают эту работу при перемещении заряда внутри источника от его отрицательного полюса к положительному).

Сторонние силы – это любые силы, действующие на заряженные частицы, кроме сил электростатического поля. Они обусловлены химическими реакциями, контактными явлениями, механическими, тепловыми и другими неэлектромагнитными процессами, происходящими в источниках питания электрических цепей.

По типу преобразований энергии в источниках тока различают: *химическую* ЭДС (гальванические батареи, ванны, аккумуляторы), *фотоэлектрическую* ЭДС (фотоэлементы, фотодиоды); *электромагнитную* ЭДС (генератор) и др.

Основная единица ЭДС в СИ: $[\mathcal{E}] = 1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$



Рис. 2.7

Закон Ома для неоднородного участка цепи. Участок электрической цепи, содержащий последовательно соединенные резисторы и источники тока, называют *неоднородным*.

Сила тока, в неоднородном участке цепи:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}}{r + R},$$

где $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов между концами участка цепи; \mathcal{E} – электродвижущая сила, r – внутреннее сопротивление источника тока; R – сопротивление участка цепи.

Направление обхода участка цепи **всегда** выбирается от точки 1, потенциал которой φ_1 к точке 2, потенциал которой φ_2 ($\varphi_1 > \varphi_2$).

Сила тока I считается положительной, если направление тока совпадает с направлением обхода участка цепи, и отрицательной – в противоположном случае (рис. 2.8).

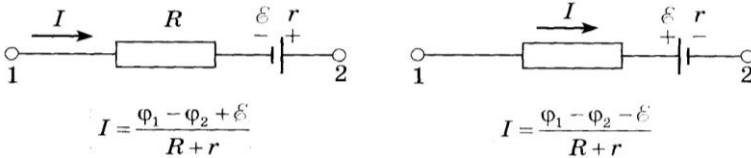


Рис. 2.8

ЭДС считается положительной, если она создает на участке цепи ток, который по направлению совпадает с направлением обхода (если при обходе участка цепи мы идем от «-» к «+» источника ЭДС), и отрицательным – в противоположном случае (если при обходе участка цепи мы идем от «+» к «-» источника ЭДС).

Закон Ома для полной цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС источника тока и полное сопротивление цепи. Поскольку при перемещении заряда по замкнутому контуру работа электростатических сил равна нулю (рис. 2.9), то из закона Ома для неоднородного участка цепи следует, что $I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}$, где I – сила тока в цепи, \mathcal{E} – ЭДС источника тока, r – его внутреннее сопротивление, R –

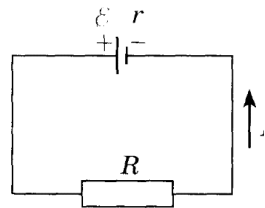


Рис. 2.9

сопротивление внешнего участка цепи (потребитель, соединительные провода и др.). Эта формула является математическим выражением закона Ома для полной цепи, согласно которому **сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи** (сумме сопротивлений ее внешнего и внутреннего участков).

Закон Ома для полной цепи можно записать в виде:

$\mathcal{E} = U + Ir$, где $U = IR$ – напряжение на внешнем участке цепи.

Если сопротивление внешнего участка цепи стремится к нулю ($R \rightarrow 0$), то сила тока в данной цепи будет максимальной. Такой ток называют током короткого замыкания: $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$.

Ток короткого замыкания зависит только от ЭДС источника тока и его внутреннего сопротивления.

Полная мощность, развиваемая источником тока в замкнутой пи, $P = I\mathcal{E} = I^2(R + r)$.

Мощность тока на внешнем участке цепи $P_1 = IU = I\mathcal{E} - I^2r$, ($P = IU = I^2R$) является полезной, а мощность $P_2 = I^2r$, потребляемая внутренним участком цепи – бесполезной (теряемая мощность).

Коэффициент полезного действия источника тока – это физическая безразмерная величина, равная отношению мощности, потребляемой внешним участком цепи (полезной мощности), к мощности, развиваемой источником тока (полной мощности):

$$\eta = \frac{P_1}{P} = \frac{IU}{I\mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R + r}.$$

Полезная мощность источника тока максимальна, если сопротивления внешнего и внутреннего участков цепи равны ($R = r$) (рис. 2.10а):

$$P_{\text{max}} = I^2R = \left(\frac{\mathcal{E}}{R + r}\right)^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}.$$

Коэффициент полезного действия источника тока соответствующий максимальной мощности, $\eta = 50\%$ (рис. 2.10б).

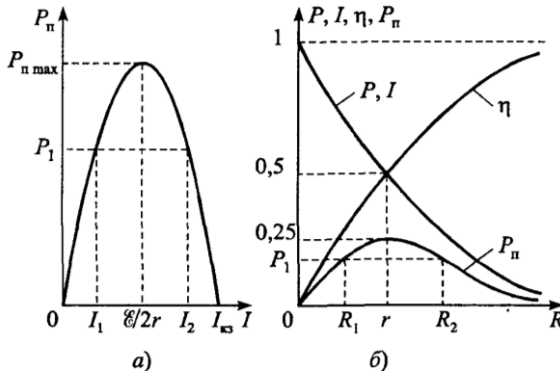


Рис. 2.10

2.6. Работа и мощность тока. Закон Джоуля–Ленца

При упорядоченном движении заряженных частиц в электрической цепи стационарное электрическое поле, созданное источником тока, совершает работу, которую называют *работой тока*.

Если за промежуток времени Δt через поперечное сечение проводника проходит заряд q , то электрическое поле совершает работу

$$A = qU = IU\Delta t.$$

Мощностью тока называют работу тока, отнесенную к единице времени:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU.$$

В общем случае на внешнем участке цепи имеет место превращение энергии стационарного электрического поля, созданного источником тока, в другие виды энергии (механическую, внутреннюю, энергию электромагнитного излучения и др.). Следовательно, работа тока на внешнем участке цепи $A = IU\Delta t = E_{\text{мех}} + E_{\text{хим}} + E_{\text{изл}} + Q$.

Если к источнику тока подключен электродвигатель, то $IU\Delta t = E_{\text{мех}} + Q$.

Если прохождение тока сопровождается химическими реакциями (электролиз, зарядка аккумулятора и др.), то $IU\Delta t = E_{\text{хим}} + Q$.

При работе электроосветительного оборудования: $IU\Delta t = E_{\text{изл}} + Q$.

При включении в цепь электронагревательных приборов: $IU\Delta t = Q$.

Работа тока на произвольном участке цепи не равна количеству теплоты, выделяемой на этом участке при прохождении тока:

$$IU\Delta t \neq I^2R\Delta t.$$

Основной единицей работы тока в СИ является джоуль. 1 Дж – работа тока, эквивалентная механической работе 1 Дж.

Основная единица мощности тока в СИ – ватт. 1 Вт равен мощности тока, эквивалентной механической мощности 1 Вт.

В качестве внесистемных единиц работы и мощности тока используют $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ и $1 \text{ кВт} = 1 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ соответственно.

Согласно экспериментально установленному закону Джоуля–Ленца (по имени английского физика Дж. П. Джоуля и русского физика Э. Х. Ленца), **количество теплоты, выделяющееся в проводнике сопротивлением R за промежуток времени Δt при прохождении по нему постоянного электрического тока, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и промежутку времени прохождения тока: $Q = I^2R\Delta t$** , где I – сила тока в проводнике.

Мощность тепловых потерь определяется по формуле $P_{\text{т}} = I^2R$.

Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химического действия, тона участке цепи имеет место превращение энергии стационарного электрического поля, созданного источником тока, только во внутреннюю энергию участка (вся работа

электрического тока идет на увеличение внутренней энергии проводника). В этом случае $A = Q$. Следовательно, $IU\Delta t = I^2 R\Delta t = \frac{U^2}{r} \Delta t$.

Мощность тока в однородном участке цепи:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Информация об энергетических превращениях в электрической цепи систематизирована в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Энергетические превращения в электрической цепи

Факты, свойства, характеристики	Физические закономерности
Основной экспериментальный закон, устанавливающий взаимосвязь силы тока в проводнике с изменением внутренней энергии проводника (закон Джоуля–Ленца)	Количество теплоты, выделяющееся в проводнике с сопротивлением R за промежуток времени Δt при прохождении по нему постоянного электрического тока: $Q = I^2 R\Delta t$
Взаимосвязь количества теплоты с характеристиками свободных носителей зарядов и со свойствами вещества проводника	Преобразование энергии упорядоченного движения свободных носителей зарядов во внутреннюю энергию проводника: $I = \frac{\varepsilon}{R+r}, R = \rho \frac{l}{S}, I = q_0 n \langle v \rangle S$
Взаимосвязь количества теплоты с характеристиками свободных носителей зарядов и со свойствами вещества проводника	Принцип работы источника тока: разделение зарядов внутри источника между клеммами; создание стационарного электрического поля во внешней цепи. Полная работа тока: $A = \varepsilon q = \varepsilon I \Delta t = IU\Delta t + I^2 r \Delta t$. Количество теплоты, выделяющееся в источнике тока, $Q_{\text{ист}} = I^2 r \Delta t$
Основные единицы физических величин, в СИ	Q – количество теплоты, выделяющейся на участке цепи, $[Q] = 1 \text{ Дж}$; I – сила тока в проводнике, $[I] = 1 \text{ А}$; R – электрическое сопротивление проводника, $[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом}$; ρ – удельное электрическое сопротивление вещества проводника, $[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

2.7. Электрический ток в электролитах

Электролитами (греч. electron – янтарь и греч. lytos –разлагаемый, растворимый) называют жидкие и твердые химические вещества, обладающие преимущественно ионной проводимостью: проводники, в которых электрический ток обусловлен движением ионов (проводники 2-го рода).

Электрический ток в электролитах сопровождается химическими реакциями на электродах. К электролитам относятся растворы солей, кислот и щелочей. При растворении вещества происходит электролитическая диссоциация. Электролитическая диссоциация – это процесс распада молекул вещества на отдельные ионы. Электролиты называют проводниками второго рода.

В некоторых случаях наблюдается смешанная электропроводность – электронно-ионная (например, в растворах щелочных металлов, в жидком аммиаке NH_3); высокой проводимостью обладают электролиты с протонной проводимостью.

Ион (греч. ion – идущий) – электрически заряженная частица, образующаяся при отрыве или присоединении одного или нескольких электронов (или других заряженных частиц) к атому, молекуле, радикалу и другому иону. Положительно заряженные ионы называют катионами, отрицательно заряженные – анионами. Ион обозначают химическим символом с индексом (вверху справа), указывающим знак и значение заряда – кратность иона – в единицах заряда электрона (Li^+ , H^{2+} , SO_4^{2-}). Понятия «ион», «катион» и «анион» введены в 1834 г. М. Фарадеем (M. Faraday).

Анион (греч. anion – идущий вверх) – отрицательно заряженный ион, движущийся в электрическом поле к аноду. Анионы содержатся в растворах и расплавах большинства солей, кислот и оснований. Анионами называют также отрицательно заряженные ионы в ионных кристаллах.

Катион (греч. kata – вниз и ion – идущий) – положительно заряженный ион, движущийся в электрическом поле к катоду. Катионы содержатся в растворах и расплавах большинства солей, кислот и оснований. Катионами называют также положительно заряженные ионы в ионных кристаллах.

Электролиз (греч. electro – янтарь и греч. lysis – разложение, растворение, распад) – совокупность электрохимических реакций (химических реакций с участием свободных электронов), протекающих на поверхностях электродов в электрической цепи, состоящей из последовательно включенных электронных и ионных проводников.

В простейшем случае такая цепь может быть представлена схемой $M_1 \rightarrow \mathcal{E} \rightarrow M_2$, где M_1 и M_2 – электронные проводники (металлы), \mathcal{E} – электролит (например, раствор кислоты, основания или соли, расплав соли и т. д.). Пропускание электрического тока от внешнего источника через электролит приводит к химическому разложению растворителя или других компонентов электролита (ионного проводника) и к образованию новых веществ. Электрохимические реакции в цепи протекают на поверхностях электродов.

Электрод (греч. electro – янтарь и греч. hodos – путь) в электрохимии – элемент электрической цепи, являющийся электронным проводником (металл, графит и т. п.), погруженный в ионный проводник или соприкасающийся с ним.

Анод – электрод в электролите, подключенный к положительному полюсу источника тока, около которого происходит окисление ионов или молекул, входящих в состав электролита.

Катод – электрод, подключенный к отрицательному полюсу источника тока, на поверхности которого происходит восстановление ионов, входящих в состав электролита.

В местах контакта электронного и ионного проводников (на поверхности электродов) поток электронов в первом проводнике сменяется на поток ионов во втором. Электрохимическая реакция служит *стоком* заряженных частиц, подходящих из объема электролита к поверхности одного из электродов, и *источником* частиц, отходящих от поверхности другого электрода вглубь электролита (ионы электролита движутся к электродам: положительно заряженные ионы (катионы) – к катоду, а отрицательно заряженные ионы (анионы) – к аноду).

В результате обеспечивается непрерывность электрического тока («эстафетная» передача зарядов) и предотвращается накопление или исчезновение заряженных частиц в поверхностном слое электродов.

Массу вещества, выделившегося при электролизе, можно определить, используя законы Фарадея.

Первый закон электролиза: масса m вещества, которое выделяется при электролизе на каждом из электродов, пропорциональна значению электрического заряда q , прошедшего через электролит ($m = kq$).

Так как заряд q , прошедший через электролит за промежуток времени Δt , $q = I\Delta t$, где I – сила тока, то $m = kI\Delta t$. Коэффициент пропорциональности k равный массе вещества, выделившегося на электроде при прохождении через раствор единицы заряда, называют *электрохимическим эквивалентом* этого вещества.

Отношение молярной массы M ионов вещества к их валентности n называется *химическим эквивалентом вещества* $\frac{M}{n} = x$.

Второй закон электролиза устанавливает связь между электрохимическим и химическим эквивалентами вещества:

Второй закон электролиза: электрохимические эквиваленты всех веществ пропорциональны их химическим эквивалентам:

$$\frac{k}{x} = \frac{1}{F'}$$

где F – постоянная Фарадея (число Фарадея), фундаментальная физическая константа, равная произведению постоянной Авогадро N_A и элементарного электрического заряда e (модуль заряда электрона): $F = N_A \cdot e = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 96\,500 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$. Следовательно, отношение масс $\frac{m_1}{m_2}$ различных веществ, претерпевающих химические превращения на электродах при прохождении одинаковых электрических зарядов ($q_1 = q_2$), равно отношению химических эквивалентов этих веществ $\frac{x_1}{x_2}$.

Объединенный закон электролиза: масса вещества, выделившегося при электролизе на каждом из электродов, прямо пропорциональна молярной массе ионов этого вещества, силе тока и времени его прохождения через электролит и обратно пропорциональна валентности ионов вещества:

$$\Delta m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} \Delta q = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I \Delta t.$$

Основная единица электрохимического эквивалента вещества в СИ: $[k] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}}$.

Электролиз применяется для получения очистки и рафинирования металлов (алюминий, бериллий, кальций, медь, натрий и др.); электролитического нанесения покрытий (золочение, серебрение, никелирование и др.); формирования изображений (гальванопластика) и т.д..

При прохождении электрического тока в электролитах выполняются законы Ома и Джоуля–Ленца.

2.8. Электрический ток в газах

Газы в обычном состоянии не проводят электрический ток, то есть являются диэлектриками. Это обусловлено отсутствием в них свободных электрических зарядов. Газ становится электропроводным только в том случае, если в результате внешнего воздействия происходит его ионизация.

Ионизация газа – это превращение электрически нейтральных частиц газа (атомов, молекул) в результате удаления из них одного или нескольких электронов в положительные ионы и свободные электроны. Нейтральные атомы и молекулы газа могут присоединять электроны, образуя отрицательные ионы. Поэтому в результате ионизации в газе появляются три типа свободных носителей заряда – положительно заряженные ионы, электроны и отрицательно заряженные ионы.

Для ионизации атома (молекулы) необходимо совершить работу против сил взаимодействия между электроном, который отрывается, и оставшейся частью атома (молекулы). Эту работу называют *работой ионизации*.

Работа (энергия) ионизации атомов или молекул газа W_i определяется из формулы $\frac{mv^2}{2} \geq W_i$.

Ударная ионизация одноатомного газа электронами или ионами возможна при выполнении условия $\frac{mv^2}{2} \geq A_i \left(1 + \frac{m}{M}\right)$, где m – масса частицы, которая вызывает ионизацию атома (молекулы); $\frac{mv^2}{2}$ – ее кинетическая энергия; A_i – работа ионизации, M – масса атома.

Если учесть, что заряженная частица приобретает кинетическую энергию под действием электрического поля, то $\frac{mv^2}{2} = qE\langle\lambda\rangle$, где q – заряд частицы; $\langle\lambda\rangle$ – средняя длина ее свободного пробега. Поэтому напряженность поля, при которой начнется ударная ионизация, $E \geq \frac{A_i}{q\langle\lambda\rangle} \left(1 + \frac{m}{M}\right)$.

Основными механизмами ионизации являются следующие: ударная ионизация (соударения с электронами, ионами, атомами); ионизация светом (фотоионизация); ионизация полем; ионизация при взаимодействии с поверхностью твердого тела (поверхностная ионизация)

Электрический разряд – прохождение электрического тока через ионизованные газы, возникновение и поддержание ионизованного состояния под действием электрического поля.

Ионизированные газы относятся к проводникам третьего рода. Носителями тока в них являются свободные электроны и ионы, которые возникают под воздействием внешнего ионизатора или электрического поля, существующего в газе.

Если проводимость газа обусловлена действием внешнего ионизатора, или, например, благодаря электронной эмиссии, вызванной накаливанием катода, то разряд называется *несамостоятельным*.

При некотором напряжении, зависящем от рода газа, давления и расстояния между электродами d , происходит пробой и зажигается самостоятельный разряд, который не нуждается в постороннем источнике ионизации.

Зависимость силы тока в газе от напряжения называют *вольтамперной характеристикой газового разряда*.

Рассмотрим отдельные участки вольтамперной характеристики газового разряда (рис. 2.11).

На участке OA количество ионов, выносимых током из разрядного промежутка, во много раз меньше количества ионов, которые рекомбинируют, так как напряженность электрического поля мала. Концентрация ионов в газе на этом участке является постоянной (значит, сопро-

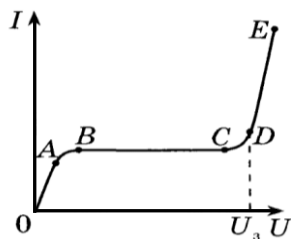


Рис. 2.11

тивление газового промежутка также постоянно) и не зависит от силы тока. Поэтому на данном участке сила тока прямо пропорциональна приложенному напряжению, то есть выполняется закон Ома.

На участке AB рост тока замедляется. Это обусловлено увеличением количества ионов, которые выносятся током из разрядного промежутка, и соответствующим уменьшением концентрации ионов, что ведет к увеличению сопротивления газового промежутка. Поэтому зависимость силы тока от напряжения на этом участке является нелинейной (рост силы тока замедляется).

На участке BC практически все ионы, возникающие под воздействием внешнего ионизатора, выносятся током из разрядного промежутка. Сила тока на этом участке достигает насыщения и не зависит от напряжения.

Участок CD соответствует самостоятельному лавинному разряду. В результате ударной ионизации свободные электроны ускоряются электрическим полем и вызывают ионизацию новых молекул, то есть являются вторичным ионизатором. Это ведет к лавинообразному нарастанию числа вторичных электронов и ионов по сравнению с числом электронов и ионов, созданных внешним ионизатором, и усилению разрядного тока (заметим, что энергии ионов в этом случае недостаточно для возникновения ударной ионизации).

Начиная с точки D , энергия положительно заряженных ионов, достигающих катода, становится больше работы выхода электронов с поверхности катода. Если выключить внешний ионизатор, то при напряжении между электродами, которое соответствует точке D , разряд будет поддерживаться за счет вторичной эмиссии электронов с поверхности катода, поэтому участок DE -характеристики соответствует самостоятельному разряду. Напряжение, соответствующее точке D , называется *напряжением зажигания* газового разряда.

При самостоятельном разряде роль ионизатора выполняют столкновения ионов с холодным катодом газоразрядной трубки.

Для ионизированных газов закон Ома не выполняется вследствие сильной зависимости концентрации носителей тока от напряженности внешнего электрического поля, поэтому вольтамперная характеристика для них является нелинейной.

2.9. Полупроводники

К полупроводникам относятся 12 химических элементов: бор, углерод, кремний, германий, олово, фосфор, мышьяк, сурьма, сера, селен, теллур, кристаллический йод. Кроме того, полупроводниками являются химические соединения элементов третьей и пятой, второй и шестой

групп периодической системы элементов Д. И. Менделеева, многие оксиды и сульфиды металлов, ряд других химических соединений и некоторые органические вещества.

Различают два вида проводимости полупроводников: *собственную* и *примесную*.

Введение примеси в кристаллическую структуру полупроводника называют *легированием полупроводника*, а возникающую при этом проводимость – *примесной*. Примеси, легко отдающие электроны и тем самым увеличивающие концентрацию свободных электронов в полупроводнике, называют *донорными* (отдающими) примесями. Донорными являются примеси элементов V группы (P, As, Sb, Bi) в элементарных полупроводниках IV группы – Ge и Si. Примеси, наличие которых в кристалле полупроводника ведет к образованию дырок, называют *акцепторными* (лат. acceptor – принимающий) примесями. Акцепторными являются примеси элементов III группы (B, Al, Ga, In) в элементарных полупроводниках IV группы – Ge и Si.

В зависимости от того, какая примесь введена в кристаллическую структуру чистого полупроводника, различают примесные полупроводники – *n*-типа (донорная примесь) и полупроводники – *p*-типа (акцепторная примесь).

Носителями тока в полупроводниках как *n*-, так и *p*-типа являются свободные электроны, а не формально введенные дырки. Дырок как реально существующих положительных зарядов в действительности нет. Однако они являются хорошей физической моделью, дающей возможность рассматривать ток в полупроводниках с точки зрения законов классической физики.

Чистые полупроводники обладают *электронно-дырочной проводимостью*.

В зоне контакта полупроводников с разными типами примесной проводимости образуется тонкий слой, который называется *электронно-дырочным переходом* или *(n-p)-переходом*, который обладает односторонней проводимостью (в зоне перехода между полупроводниками *n*- и *p*-типов образуется *запирающий слой*).

Если положительный полюс источника тока подключить к *p*-области, а отрицательный – к *n*-области, (*n-p*)-переход будет включен в *прямом* (пропускном) *направлении* (рис. 2.12).

Если положительный полюс источника тока подключить к *n*-области, а отрицательный – к *p*-области, (*n-p*)-переход будет включен в *обратном* (запирающем) *направлении* и сила тока через него практически равна нулю (рис. 2.13).

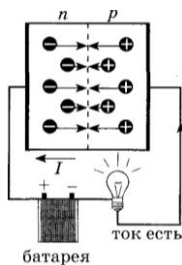


Рис. 2.12

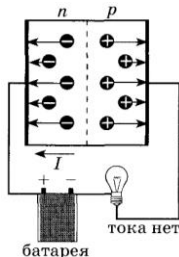


Рис. 2.13

Для полупроводников закон Ома не выполняется вследствие сильной зависимости концентрации носителей тока от температуры, поэтому вольт-амперная характеристика для полупроводника является нелинейной.

Тренировочные упражнения для закрепления теоретического материала

1. Методические указания по решению задач

В задачах, относящихся к данной теме, рассматривается применение законов постоянного тока для расчета параметров конкретных электрических цепей и физических величин, характеризующих явления, сопровождающие существование тока в цепи.

В качестве физической системы рассматривается либо замкнутая электрическая цепь, либо отдельные ее участки (однородные или неоднородные). Как правило, может быть выделено несколько состояний системы, которые отличаются друг от друга значениями токов, сопротивлений, напряжений, ЭДС и др. Причем каждое из этих состояний может быть описано законами постоянного тока. Идеальной моделью является цепь, сопротивления всех элементов которой, за исключением сопротивлений потребителей и источников тока, считаются равными нулю. Идеальной моделью любого участка цепи, не содержащего источников тока, является однородный участок цепи.

Цепи, содержащие конденсаторы, рассматривают в предположении, что переходные процессы прекратились и сила тока на участках цепи, содержащих конденсаторы, равна нулю, но напряжение на этих участках имеется, так как конденсаторы заряжены.

Если внешняя цепь представляет собой однородный неподвижный проводник (резистор), в котором при прохождении тока, отсутствуют химические превращения, и нет потерь на излучение, то прохождение тока сопровождается только изменением внутренней энергии и для решения задачи, кроме законов постоянного тока, можно использовать первый закон термодинамики.

Если прохождение тока сопровождается изменением механической энергии, то, кроме законов постоянного тока, необходимо использовать закон сохранения и превращения энергии, либо теорему об изменении кинетической энергии системы.

Решение задач, в которых рассматривается ток в жидкостях, основано на использовании первого или объединенного законов Фарадея, а также вспомогательных формул для нахождения массы, заряда, силы тока. Если при электролизе на электродах происходит выделение газа, то дополнительно используется уравнение состояния идеального газа.

Задачи, связанные с электропроводностью металлов и полупроводников, решаются на основе законов постоянного тока и формул для расчета силы тока в классической электронной теории проводимости.

При решении задач, в которых необходимо учесть зависимость сопротивления от температуры, предполагается, что в рассматриваемом интервале температур, температурный коэффициент сопротивления проводника является постоянным. Кроме того, нужно помнить, что в формулы входит значение удельного сопротивления при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а табличные значения заданы для температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Примеры решения задач

Задача 1. При подключении к источнику постоянного электрического тока реостата напряжение на нем $U_1 = 6,0\text{ В}$, а сила тока в цепи $I_1 = 3,0\text{ А}$. Определите внутреннее сопротивление источника тока, если при изменении сопротивления реостата напряжение на нем возросло до $U_2 = 9,0\text{ В}$, а сила тока в цепи уменьшилась до $I_2 = 1,0\text{ А}$.

<p>Дано: $U_1 = 6,0\text{ В}$ $I_1 = 3,0\text{ А}$ $U_2 = 9,0\text{ В}$ $I_2 = 1,0\text{ А}$ $r = ?$</p>	<p>Решение. Из закона Ома для полной цепи запишем выражения для ЭДС источника тока: $E = I_1(R_1 + r)$ и $E = I_2(R_2 + r)$, где R_1 – первоначальное сопротивление реостата, а R_2 – сопротивление реостата после изменения.</p>
---	--

Решая систему из этих двух уравнений с учетом того, что $R_1 = \frac{U_1}{I_1}$,

а $R_2 = \frac{U_2}{I_2}$, получим $I_1\left(\frac{U_1}{I_1} + r\right) = I_2\left(\frac{U_2}{I_2} + r\right)$. Откуда, $r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$.

$$r = \frac{9,0\text{ В} - 6,0\text{ В}}{3,0\text{ А} - 1,0\text{ А}} = 1,5\text{ Ом.}$$

Ответ: $r = 1,5\text{ Ом}$.

Задача 2. Два резистора сопротивлениями $R_1 = 20$ Ом и $R_2 = 30$ Ом соединены параллельно и подключены к источнику постоянного электрического тока с ЭДС $E = 26$ В. Определите внутреннее сопротивление источника тока, если сила тока в неразветвленной части цепи $I = 2,0$ А.

Дано: $R_1 = 20$ Ом $R_2 = 30$ Ом $E = 26$ В $I = 2,0$ А $r = ?$	Решение. Внутреннее сопротивление источника тока определим из закона Ома для полной цепи: $r = \frac{E}{I} - R$, где R – общее сопротивление участка электрической цепи, состоящего из двух параллельно соединенных резисторов.
--	---

С учетом того, что $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, получим $r = \frac{E}{I} - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

Следовательно, $r = 1,0$ Ом.

Ответ: $r = 1,0$ Ом.

Задача 3. Определите ЭДС и коэффициент полезного действия источника постоянного электрического тока, если при силе тока в цепи $I = 2,0$ А его максимальная мощность на внешнем участке цепи $P_{\text{полезн.}}^{\text{max}} = 16$ Вт.

Дано: $I = 2,0$ А $P_{\text{полезн.}}^{\text{max}} = 16$ Вт $E = ? \eta = ?$	Решение. Из закона Ома для полной цепи следует, что ЭДС источника тока: $E = I(R + r)$. Мощность тока на внешнем участке цепи будет максимальна, если $R = r$.
--	---

Тогда, $E = 2IR$. С учетом того, что $R = \frac{P_{\text{полезн.}}^{\text{max}}}{I^2}$, получим $E = \frac{2P_{\text{полезн.}}^{\text{max}}}{I}$.

Коэффициент полезного действия источника тока $\eta = \frac{R}{R + r}$. Следовательно, $E = 16$ В, $\eta = 0,5 = 50\%$.

Ответ: $E = 16$ В, $\eta = 50\%$.

Задача 4. Из однородной металлической проволоки сопротивлением $R = 8,0$ Ом изготовили два одинаковых кольца. Кольца имеют перемычки, сопротивление которых $R_1 = R_2 = 1,0$ Ом. Кольца с перемычками включены в электрическую цепь (рис. 2.14). Определите силу тока в цепи, если напряжение на полюсах источника тока $U = 4,5$ В.

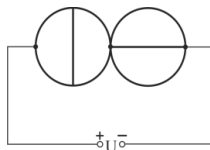


Рис. 2.14

Дано:
 $R = 8,0 \text{ Ом}$
 $R_1 = R_2 = 1,0 \text{ Ом}$

$I - ?$

Решение. Ток через вертикальную перемычку в первом кольце не идет, поскольку потенциалы ее верхнего и нижнего концов одинаковые. Оставшиеся два полукольца, сопротивлением $R_1 = R_3 = 2,0 \text{ Ом}$, каждое соединены параллельно. Их общее сопротивление $R_1 = 1,0 \text{ Ом}$

Второе из колец состоит из трех соединенных параллельно частей (две полуокружности и перемычка), сопротивления которых $R_1 = R_3 = 2,0 \text{ Ом}$ и $R_2 = 1,0 \text{ Ом}$. Тогда, $R_{1-3} = \frac{R_1}{2} = 1 \text{ Ом}$. Общее сопротивление

второго кольца $R_{II} = \frac{R_{1-3} \cdot R_2}{R_{1-3} + R_2} = 0,5 \text{ Ом}$. Следовательно, общее сопротивление участка цепи: $R_{\text{общ}} = R_1 + R_{II} = 1,5 \text{ Ом}$.

$$\text{Сила тока в цепи } I = \frac{U}{R_{\text{общ}}} = \frac{4,5 \text{ В}}{1,5 \text{ Ом}} = 3,0 \text{ А.}$$

Ответ: $I = 3,0 \text{ А}$.

Задача 5. По медному проводу, площадь поперечного сечения которого $S = 2,0 \text{ мм}^2$, проходит электрический ток силой $I = 0,50 \text{ А}$. Определите модуль средней скорости направленного движения свободных электронов, считая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон. Для меди плотность $D = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, молярная масса

$$M = 6,4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Дано:
 $S = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
 $I = 0,50 \text{ А}$
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
 $D = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$$M = 6,4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$\langle v \rangle - ?$

Решение. Модуль средней скорости направленного движения свободных электронов определим по формуле $\langle v \rangle = \frac{I}{enS}$. Концентрацию свободных элек-

тронов в проводнике определим по формуле $n = \frac{N}{V}$

$$\text{, где } N = \frac{m}{M} N_A = \frac{DV}{M} N_A.$$

$$\text{Тогда, } \langle v \rangle = \frac{IVM}{eDVS N_A} = \frac{IM}{eDS N_A}.$$

$$\text{Следовательно, } \langle v \rangle = 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $\langle v \rangle = 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 6. При температуре $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ сопротивление никелевого проводника $R_1 = 40 \text{ Ом}$. При подключении к источнику постоянного

электрического тока этого проводника по нему проходит ток силой $I = 0,50$ А и проводник нагревается до температуры $t_2 = 159$ °С. Определите напряжение на полюсах источника тока, если температурный коэффициент сопротивления никеля $\alpha = 6,5 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Дано:

$$t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_1 = 40 \text{ Ом}$$

$$I = 0,50 \text{ А}$$

$$t_2 = 159 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

$$U = ?$$

Решение. Для определения напряжения на полюсах источника тока воспользуемся законом Ома для участка цепи $U = IR_2$.

Для определения сопротивления проводника R_2 воспользуемся формулой зависимости сопротивления проводника от температуры: $R_1 = R_0(1 + \alpha t_1)$, $R_2 = R_0(1 + \alpha t_2)$. Следовательно, $R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}$, тогда $U = IR_1 \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}$. Численно $U = 36$ В.

Ответ: $U = 36$ В.

Задача 7. Какой длины нужно взять нихромовый проводник диаметром 1 мм, чтобы изготовить нагреватель, способный за три минуты нагреть 0,5 кг воды от 10 °С до 100 °С, если КПД нагревателя 90 %, напряжение на зажимах источника питания 120 В?

Дано:

$$t = 3,0 \text{ мин} = 180 \text{ с}$$

$$m = 0,50 \text{ кг}$$

$$t_1 = 10^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$\eta = 90 \%$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$l = ?$$

Решение. В процессе перехода термодинамической системы «сосуд с водой – нихромовый проводник с током – окружающая среда» из начального состояния (в момент непосредственно после замыкания электрической цепи) в конечное (спустя три минуты после замыкания цепи) имеет место необратимый переход энергии электрического тока во внутреннюю энергию.

Поэтому изменение полной энергии рассматриваемой системы представляет собой только изменение ее внутренней энергии. Причем $\Delta W = \Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4$, где ΔU_1 , ΔU_2 , ΔU_3 и ΔU_4 – изменения внутренней энергии воды, проводника, сосуда и окружающей среды соответственно.

По условию задачи, $\Delta U = \eta \Delta W$. Так как в результате изменения внутренней энергии воды происходит только ее нагревание от температуры $T_2 = 283$ К до температуры $T_1 = 373$ К, то $\Delta U_1 = cm(T_2 - T_1)$, где c – удельная теплоемкость воды. Следовательно, $\Delta W = cm(T_2 - T_1)$.

Изменение полной энергии рассматриваемой системы при сделанных выше допущениях равно работе тока (точнее – работе сторонних

сил, создающих в проводнике стационарное электрическое поле, под действием которого на участке цепи существует электрический ток): $\Delta W = A_{\text{тока}}$. Поэтому $\eta A_{\text{тока}} = cm(T_2 - T_1)$.

Поскольку при прохождении тока по любому проводнику имеет место только превращение энергии источника тока во внутреннюю энергию проводника, то $A_{\text{тока}} = Q = I^2 R t$, где I – сила тока в проводнике, R – его сопротивление.

Рассматривая систему «нихромовый проводник с током» как однородный участок электрической цепи, можно выразить силу тока I через сопротивление проводника R и напряжение на его концах U , используя закон Ома для участка цепи, в соответствии с которым $I = \frac{U}{R}$. Сопротивление проводника $R = \rho \frac{l}{S}$, где $\rho = 1,1$ мкОм·м – удельное сопротивление нихрома, $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения проводника.

Если пренебречь изменением сопротивления проводника вследствие его нагревания от температуры T_1 до температуры T_2 , то

$$A_{\text{тока}} = \frac{U^2 \pi d^2 t}{4 \rho l}.$$

Следовательно, $\eta \frac{U^2 \pi d^2 t}{4 \rho l} = cm(T_2 - T_1)$. Откуда длина проводника $l = \frac{\eta U^2 \pi d^2 t}{4 \rho cm(T_2 - T_1)}$. После подстановки числовых значений, получим: $l = 8,81$ м.

Ответ: $l = 8,81$ м.

Задача 8. Электроэнергия от генератора, напряжение, на полюсах которого равно U_0 , передается потребителю сопротивлением R_0 . При каком значении сопротивления линии электропередачи потери в ней будут минимальными? Чему равна мощность, потребляемая нагрузкой в этом случае?

Дано:

$$U_0$$

$$R_0$$

$$P_{\text{потерь}} = P_{\text{лмин}}$$

$$R - ?, P_{\text{max}} - ?$$

Решение. Рассмотрим «участок цепи», состоящий из последовательно соединенных линии электропередачи и потребителя, моделируя его как однородный участок цепи, состоящий из двух резисторов R_0 и R , соединенных последовательно. Изменение внутренней энергии этого участка при прохождении тока равно количеству теплоты $Q = I^2(R + R_0)t$, которое может быть определено по закону Джоуля–Ленца, которое, в свою очередь, равно работе тока: $A = A_{\text{тока}} = IU_0 t$.

Сила тока в линии электропередачи $I = \frac{U_0}{R_0 + R}$, где $R_0 + R$ – общее сопротивление рассматриваемого участка.

Следовательно, $IU_0 t = I^2(R + R_0)t$ $IU_0 t = I^2(R + R_0)t$,

где IU_0 – мощность, развиваемая генератором, I^2R – мощность, теряемая в линии электропередачи, I^2R_0 – мощность, потребляемая нагрузкой.

Мощность, теряемая в линии электропередачи, $P = IU_0 - I^2R_0$.

Принимая во внимание, что $I = \frac{U_0}{R_0+R}$, получим:

$$P = \frac{U_0^2}{R_0+R} - \frac{U_0^2 R_0}{(R+R_0)^2} = \frac{U_0^2 R}{(R+R_0)^2}.$$

Следовательно, $P = P(R)$. Значение сопротивления $R = R_x$, при котором потери мощности будут минимальными, соответствует минимальному значению функции $P = P(R)$.

В точке минимума первая производная от мощности по сопротивлению линии должна обращаться в нуль, то есть $P'(R_x) = 0$, где R_x – искомое сопротивление. Вычислив производную и приравняв ее к нулю, получим $\frac{U_0^2(R_x - R_0)}{(R_x + R_0)^2} = 0$, откуда $R_x = R_0$. В этом случае мощность, теряемая

в линии, $P_{л} = \frac{U_0^2}{4R_0}$ будет минимальной, а мощность на нагрузке $P_{н} = \frac{U_0^2}{4R_0}$ – максимальной.

Ответ: $R_x = R_0 \cdot P_{\max} = \frac{U_0^2}{4R_0}$.

Задача 9. На катоде электролитической ванны за промежуток времени $t = 10$ мин осаждается цинк массой $m = 2,6$ г. Определите мощность электрического тока, проходящего через раствор электролита, если его сопротивление $R = 0,40$ Ом. Электрохимический эквивалент цинка $k = 3,39 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Дано:

$$t = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$$

$$m = 2,6 \text{ г} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$R = 0,40 \text{ Ом}$$

$$k = 3,39 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$P = ?$

Решение. Для определения мощности электрического тока, проходящего через раствор электролита, воспользуемся формулой $P = I^2 R$.

Силу тока, проходящего через раствор электролита, определим из закона электролиза: $I = \frac{m}{kt}$.

$$I = \frac{m}{kt}$$

Таким образом, $P = \left(\frac{m}{kt}\right)^2 R$.

Численно $P = 65$ Вт.

Ответ: $P = 65$ Вт.

Задача 10. При хромировании пластины, площадь поверхности которой $S = 15 \text{ см}^2$, толщина ее покрытия увеличивается со средней скоростью $\langle v \rangle = 0,20 \frac{\text{мкм}}{\text{с}}$. Определите силу электрического тока, про-

ходящего через раствор электролита. Для хрома электрохимический эквивалент $k = 1,8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$, плотность $\rho = 7,18 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Дано:

$$S = 15 \text{ см}^2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$\langle v \rangle = 0,20 \frac{\text{мкм}}{\text{с}} = 2,0 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$k = 1,8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$$\rho = 7,18 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$I - ?$

Решение. Средняя скорость увеличения толщины покрытия пластины определяется по формуле: $\langle v \rangle = \frac{h}{t}$, где h – толщина покрытия. По закону электролиза $m = Ikt$ (1). Вместе с тем, $m = \rho Sh$ (2). Из выражений (1) и (2) следует:

$$I = \frac{\rho Sh}{kt} = \frac{\rho S \langle v \rangle}{k}. \text{ Численно:}$$

$$I = 12 \text{ А.}$$

Ответ: $I = 12 \text{ А.}$

Задача 11. При электролизе раствора азотнокислого серебра в течение 30 мин на катоде выделилось 4,8 г серебра. Определите ЭДС поляризации, если сопротивление электролита 1,6 Ом, а напряжение на зажимах электролитической ванны 4,6 В.

Дано:

$$t = 30 \text{ мин} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$m = 4,8 \text{ г} = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$R = 1,6 \text{ Ом}$$

$$U = 4,6 \text{ В}$$

$$k = 1,118 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$\mathcal{E}_n - ?$

Решение. Массу серебра, которое выделилось на катоде электролитической ванны в процессе электролиза, определим из второго закона электролиза, в соответствии с которым $m = kI\Delta t$. Для нахождения силы тока в цепи воспользуемся законом Ома для неоднородного участка цепи (раствор электролита между плоскими электродами ванны), в соответствии с которым $I = \frac{U - \mathcal{E}_n}{R}$, где R – сопротивление электролита, \mathcal{E}_n – ЭДС поляризации.

Следовательно, математическая модель ситуации, рассматриваемой в задаче, представляет систему двух уравнений: $m = kI\Delta t$

и $I = \frac{U - \mathcal{E}_n}{R}$.

Решив эту систему, получим $\mathcal{E}_n = U - \frac{mR}{k\Delta t}$. Численно: $\mathcal{E}_n = 0,77 \text{ В.}$

Ответ: $\mathcal{E}_n = 0,77 \text{ В.}$

Задача 12. Определите модуль наименьшей скорости, с которой должен двигаться электрон, чтобы при столкновении с неподвижным атомом неона ионизировать его. Потенциал ионизации атомов неона $\varphi_i = 21,5 \text{ В}$.

Дано:
 $\varphi_i = 21,5 \text{ В}$
 $v - ?$

Решение. Поскольку масса атома неона значительно больше массы электрона, то атому неона при неупругом столкновении передается практически вся кинетическая энергия, которую приобретает электрон между его последовательными столкновениями с атомами:

$$W = \frac{mv^2}{2}.$$

Вместе с тем, эта энергия должна быть равной энергии ионизации газа:

$$W = W_i. \text{ Тогда, } e\varphi = \frac{mv^2}{2}, \text{ откуда } v = \sqrt{\frac{2e\varphi^2}{m}}.$$

Численно $v = 2,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: $v = 2,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

3. Задания для самостоятельной работы

3.1. Вопросы по теме «Постоянный электрический ток»

1. Назовите существенные признаки понятия «электрический ток».
2. Какова природа электрического тока а) в металлах, б) в электролитах, в) в газах, г) в полупроводниках?
3. Что называют силой тока? Сформулируйте определение основной единицы силы тока и СИ.
4. Перечислите условия существования электрического тока в веществе.
5. Какова роль источника тока в электрической цепи?
6. Какие силы называют сторонними?
7. Выделите существенные признаки понятия «электродвижущая сила» (ЭДС) источника тока.
8. Существует ли электрическое поле между полюсами источника тока в незамкнутой цепи?
9. Какой участок электрической цепи называют а) внешним б) внутренним?
10. От чего зависит средняя скорость упорядоченного движения свободных электронов в металлическом проводнике?
11. Каким прибором измеряют силу тока и как его включают в электрическую цепь?

12. Каким прибором измеряют напряжение и как его включают в электрическую цепь?

13. Что называют *а)* сопротивлением, *б)* удельным сопротивлением проводника? Каковы причины существования сопротивления?

14. Каким прибором измеряют сопротивление и как его включают в электрическую цепь?

15. От каких физических характеристик проводника зависит его *а)* сопротивление, *б)* удельное сопротивление?

16. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи. Запишите формулу. Изобразите графически зависимость силы тока *а)* от напряжения и *б)* от сопротивления.

17. Запишите законы параллельного соединения проводников. Нарисуйте схему электрической цепи, по результатам измерений силы тока и напряжения в которой можно установить эти законы.

18. Запишите законы последовательного соединения проводников. Нарисуйте схему электрической цепи, по результатам измерений силы тока и напряжения в которой можно установить эти законы.

19. Запишите формулу для расчета зависимости сопротивления металлического проводника от температуры и поясните физический смысл величин входящих в эту формулу.

20. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.

21. Выведите формулу закона Ома для полной цепи.

22. Запишите формулу для расчета работы постоянного тока. Назовите основную единицу работы тока в СИ и внесистемные единицы работы тока. Каким прибором можно измерить работу тока?

23. Запишите формулу, которая является аналитическим выражением закона Джоуля–Ленца.

24. Как зависит количество теплоты, выделяемое током в отдельных проводниках, от сопротивления этих проводников, если проводники соединены *а)* последовательно *б)* параллельно?

25. Запишите формулу для расчета мощности постоянного тока. Назовите основную единицу мощности тока в СИ и внесистемные единицы мощности тока. Каким прибором можно измерить мощность тока?

26. Как определить *а)* полезную мощность электрического тока, *б)* полную мощность источника тока?

27. Соединенные последовательно, электроплитка и амперметр включены в электрическую цепь. Изменяются ли показания амперметра, если на нагревательный элемент плитки подуть холодным воздухом?

28. При включении электроплитки или электрокамина в сеть на длительный срок электрическая энергия расходуется непрерывно, а температура спирали остается постоянной. Почему?

29. Стеклоанный баллон электрической лампочки, проработавшей длительное время, покрывается изнутри темным налетом. Объясните причину.

30. Одна из двух одинаковых металлических спиралей расположена вертикально, а другая – горизонтально. Будут ли различаться температуры нагрева спиралей, если силы тока в них одинаковые?

31. Почему при одной и той же силе тока тонкая проволока нагревается сильнее, чем толстая?

32. Сформулируйте первый закон электролиза. Каков физический смысл электрохимического эквивалента?

33. Разъясните механизм возникновения а) несамостоятельного, б) самостоятельного разряда в газах?

34. Изобразите на графике полную вольтамперную характеристику газового разряда и охарактеризуйте ее.

35. В чем заключается принципиальное различие между самостоятельной и несамостоятельной проводимостью газов?

36. Почему при разряде в газах цвет свечения зависит от того, какой газ находится между электродами трубки?

37. Объясните механизм собственной и примесной проводимости полупроводников.

38. При каких условиях в примесных полупроводниках возникает а) электронная, б) дырочная проводимость? Приведите примеры.

39. Какой проводимостью будет обладать германий при введении в него небольшого количества алюминия? мышьяка?

40. Как влияет на проводимость полупроводников наличие в них небольшого количества примесей?

41. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры? освещенности? Почему?

42. Можно ли путем повышения температуры полупроводника увеличить его проводимость до значения равного проводимости металлов, почему?

43. Известно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, многие металлы и сплавы переходят в сверхпроводящее состояние. Можно ли путем понижения температуры получить сверхпроводящий германий?

44. В полупроводнике, который имеет собственную проводимость, концентрация свободных электронов равна концентрации дырок, однако электронный ток больше дырочного, почему?

3.2. Задачи для самопроверки

1. Площадь поперечного сечения проводника $S=4,0 \text{ мм}^2$, удельное сопротивление вещества проводника $\rho=1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Определите напряженность E стационарного электрического поля в проводнике, если сила тока в проводнике $I=20 \text{ А}$.

2. В схеме электрической цепи, представленной на рис. 2.15, сопротивления резисторов $R_1=2 \text{ Ом}$, $R_2=4 \text{ Ом}$, $R_3=6 \text{ Ом}$. Определите показание идеального амперметра I , если ЭДС источника тока $\mathcal{E}=10 \text{ В}$, а его внутреннее сопротивление $r=0,4 \text{ Ом}$.

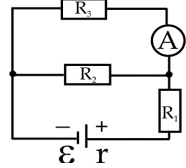


Рис. 2.15

3. Четыре резистора, сопротивления которых $R_1=1,0 \text{ Ом}$, $R_2=2,0 \text{ Ом}$, $R_3=3,0 \text{ Ом}$, $R_4=4,0 \text{ Ом}$, соединенные между собой так, что общее сопротивление полученного участка цепи $R=1,0 \text{ Ом}$, подключены к источнику постоянного тока. Определите мощность P_1 , потребляемую резистором R_1 от источника, если сила тока в резисторе R_3 составляет $I_3=4,0 \text{ А}$.

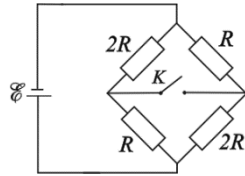


Рис. 2.16

4. Четыре резистора подключены к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E}=12 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r=1 \text{ Ом}$ (рис. 2.16). Определите силу тока I_2 в цепи при разомкнутом ключе K , если при замкнутом ключе сила тока в цепи $I_1=0,45 \text{ А}$.

5. Электрочайник, в котором находится $V=2,0 \text{ л}$ воды с удельной теплоемкостью $c=4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ при температуре $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$, имеет две спирали сопротивлением $R=25 \text{ Ом}$ каждая, соединенные друг с другом параллельно. Коэффициент полезного действия чайника $\eta=80 \%$. Определите через какой промежуток времени Δt после включения в сеть напряжением $U=120 \text{ В}$, вода нагреется до температуры кипения.

6. Зависимость силы тока в проводнике ($c=120 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$) массой $m=30 \text{ г}$, сопротивление которого $R=5,0 \text{ Ом}$, от времени имеет вид $I=B\sqrt{Dt}$, где $B=100 \text{ мА}$, $D=2,5 \text{ с}^{-1}$. Определите изменение температуры ΔT проводника через промежуток времени $\Delta t=60 \text{ с}$ после замыкания цепи, если потери энергии в окружающую среду составляют $\alpha=20 \%$.

$$\Delta T = \frac{\alpha B^2 DR \Delta t^2}{2cm}.$$

7. Электромотор питается от источника постоянного тока с ЭДС $\mathcal{E}=24 \text{ В}$. При силе тока в цепи $I=8,0 \text{ А}$ мощность на валу электромотора

$P=96$ Вт. Определите силу тока в цепи, если якорь электромотора затормозить.

8. Определите максимально возможное значение мощности тока P_{\max} на нагрузке, подключенной к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 8,0$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,50$ Ом.

9. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в медной проволоке сечением $S=1$ мм² при прохождении по ней тока силой $I=1$ А, считая, что каждый атом меди отдает один свободный электрон.

10. Катушка медной проволоки массой $m=1,13$ кг имеет сопротивление $R=260$ Ом. Определите длину l и диаметр d проволоки.

11. Стороны проволоочного куба имеют сопротивление $R=1,0$ Ом каждая. Определите силу тока, если напряжение между противоположными вершинами куба равно $U=6,0$ В (рис. 2.17).

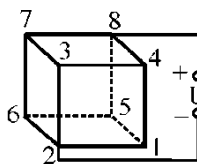


Рис. 2.17

12. Три одинаковых медных кольца, радиусом r каждое, соединены как показано на рис. 2.18. Определите силу тока I_{AB} между точками A и B , если напряжение между ними равно U . Диаметр проволоки, из которой изготовлены кольца, d .

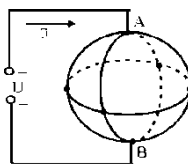


Рис. 2.18

13. Площадь поперечного сечения медной проволоки $S = 0,1$ мм², а ее масса $m = 0,1$ кг. Определите сопротивление R проволоки при температуре $t = 120$ °С.

14. Миллиамперметр сопротивлением $R = 3$ Ом, предел измерения которого $I_0 = 25$ мА, зашунтирован никелиновым проводником длиной $l = 20$ см и диаметром $d = 2$ мм. При включении в цепь стрелка прибора остановилась на делении $I_1 = 20$ мА. Определите силу тока I в цепи.

15. Гальванометр с внутренним сопротивлением $R = 100$ Ом, шкала которого рассчитана на силу тока $I = 20$ мкА, подключен к термопаре с ЭДС $\mathcal{E} = 20$ мВ и внутренним сопротивлением $r = 2$ Ом. Каким сопротивлением $R_{\text{ш}}$ нужно зашунтировать гальванометр, чтобы стрелка не выходила за пределы шкалы?

16. Если через вольтметр со шкалой на $U = 100$ В проходит ток силой $I = 0,1$ мА, то стрелка прибора отклоняется на $U_1 = 2$ В шкалы. Определите наибольшее напряжение U_{\max} , которое можно измерить этим вольтметром при подключении к нему добавочного сопротивления $R = 90$ кОм?

17. Цепь состоит из источника тока с внутренним сопротивлением r и резистора сопротивлением R . Вольтметр, подключенный сначала по-

следовательно, а затем параллельно резистору, показывает одно и тоже напряжение U . Определите сопротивление R вольтметра.

18. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 210$ В, с помощью медных проводов диаметром $d = 1,2$ мм и длиной $l = 20$ м, подключена нагрузка сопротивлением $R = 2$ Ом. Определите внутреннее сопротивление r источника, если сила тока в цепи $I = 0,7$ А.

19. Определите ЭДС \mathcal{E} и внутреннее сопротивление r источника тока, если при напряжении на зажимах источника $U_1 = 1,8$ В сила тока в цепи $I_1 = 0,2$ А, а при напряжении $U_2 = 1,6$ В – $I_2 = 0,4$ А.

20. При замыкании источника тока на сопротивление $R_1 = 2,3$ Ом сила тока в цепи $I_1 = 0,3$ А, а при замыкании на сопротивление $R_2 = 0,8$ Ом – $I_2 = 0,7$ А. Определите силу тока I_0 при коротком замыкании.

21. При замыкании аккумулятора на сопротивление R разность потенциалов на его зажимах $U = 5$ В. Если внешнее сопротивление увеличить в 6 раз, разность потенциалов на зажимах увеличится вдвое. Определите ЭДС \mathcal{E} аккумулятора.

22. Определите мощность тока P в единице объема никромового проводника длиной $l = 0,2$ м, если на его концах поддерживается напряжение $U = 4$ В.

23. Два резистора с одинаковыми сопротивлениями R соединены сначала параллельно, а затем последовательно, подключены к сети напряжением U . В каком случае от сети потребляется большая мощность?

24. Источник тока с ЭДС $\mathcal{E} = 16$ В и внутренним сопротивлением $r = 3$ Ом подключен к нагрузке. Определите сопротивление R нагрузки и КПД цепи, если мощность, рассеиваемая на ней, $P = 16$ Вт.

25. Источник тока с внутренним сопротивлением $r = 4$ Ом подключен к нагрузке сопротивлением $R = 8$ Ом. На каком другом нагрузочном сопротивлении, подключенном к источнику, тепловая мощность будет такой же как и в первом случае?

26. Проволочное кольцо включено в цепь постоянного тока. Контакты делят кольцо по длине в отношении 1:2. При этом в кольце выделяется мощность $P = 108$ Вт. Определите мощность тока P в кольце при той же силе тока во внешней цепи, если контакты разместить по его диаметру?

27. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 4$ Ом подключена лампочка мощностью $P = 45$ Вт. Будет ли она гореть нормальным накалом?

28. К генератору с ЭДС $\mathcal{E} = 110$ В и внутренним сопротивлением $r = 4$ Ом подключен электронагреватель, потребляющий ток $I = 5$ А. Определите КПД нагревателя, если известно, что за промежуток времени $\Delta t = 50$ мин, $m = 1$ кг воды нагревается от температуры $t_1 = 20$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С и $\eta = 5$ % воды успевает выкипеть.

29. Две электроплитки, сопротивления которых $R_1 = 400$ Ом и $R_2 = 200$ Ом, поочередно подключаются к одному и тому же источнику ЭДС. При этом на них выделяется одинаковая мощность $P = 200$ Вт. Определите силу тока в подводящих проводах в режиме короткого замыкания.

30. Напряжение в сети $U = 220$ В, длина медной проводки к дому $l = 50$ м. Определите площадь поперечного сечения S подводящих проводов, если известно, что при включении полной нагрузки, состоящей из $N_1 = 100$ ламп мощностью $P_1 = 75$ Вт и $N_2 = 50$ ламп мощностью $P_2 = 25$ Вт каждая, напряжение на лампах $U_{л} = 210$ В.

31. Напряжение на зажимах выпрямителя при зарядке аккумулятора $U = 13$ В, зарядный ток $I = 10$ А, сопротивление аккумулятора $r = 0,1$ Ом. Определите КПД η выпрямителя.

32. Троллейбус массой $m = 10$ т трогается с места на горизонтальном пути и, двигаясь равноускоренно, через промежуток времени $\Delta t = 10$ с приобретает скорость $v = 36 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Определите КПД η двигателя троллейбуса, который работает при напряжении $U = 500$ В и потребляет ток $I = 200$ А. Коэффициент сопротивления движению $\mu = 0,05$.

33. Определите КПД электродвигателя постоянного тока, если сила тока в момент его пуска $I_0 = 15$ А, а в установившемся режиме $I = 9$ А.

34. Определите максимальную мощность электродвигателя, включенного в сеть постоянного тока напряжением $U = 120$ В, если полное сопротивление цепи $(R+r) = 20$ Ом. Определите силу тока I в обмотке двигателя.

35. В течение какого промежутка времени Δt необходимо пропускать ток силой $I = 0,5$ А через электролит для того, чтобы покрыть изделие площадью $S = 20 \text{ см}^2$ слоем серебра толщиной $d = 20$ микрон?

36. Сколько электроэнергии нужно затратить для получения из подкисленной воды $V = 2,5$ л водорода при температуре $t = 25$ °С и давлении $p = 0,1$ МПа, если электролиз ведется при напряжении $U = 5$ В, а КПД установки $\eta = 75$ %?

РАЗДЕЛ 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

3.1. Индукция магнитного поля

Магнетизм (греч. *magneti* – магнит) – совокупность явлений, связанных с магнитным взаимодействием, которое в макроскопических масштабах проявляется между проводниками с электрическим током, между проводниками с током и магнитами (телами, обладающими магнитным моментом), а также между магнитами. Это взаимодействие осуществляется посредством магнитного поля.

Магнитное поле – это особая форма материи, созданная движущимися (относительно определенной системы отсчета) электрическими зарядами, электрическими токами, намагниченными телами и переменными электрическими полями, посредством которой осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов.

Силовой характеристикой магнитного поля является физическая векторная величина, которая называется магнитной индукцией \vec{B} (индукция магнитного поля).

Модуль магнитной индукции равен отношению максимального значения вращающего механического момента M_0 , действующего со стороны магнитного поля на рамку с током, к произведению силы тока I и площади S рамки (рис. 3.1):

$$B = \frac{M_0}{IS}.$$

Физическую величину $p_m = IS$ называют магнитным моментом рамки (контура) с током.

В общем случае механический вращающий момент, действующий на контур с током $M = p_m B \sin \alpha$, где α угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и нормалью \vec{n} к контуру (рис. 3.2).

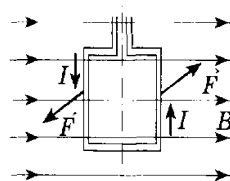


Рис. 3.1

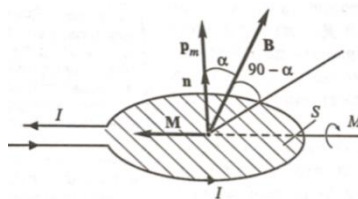


Рис. 3.2

Основной единицей индукции магнитного поля в СИ является тесла. 1 Тл – это индукция однородного магнитного поля, в котором на плоский контур с током, имеющий магнитный момент $p_m = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ (рамку площадью $S = 1 \text{ м}^2$ при силе тока в ней $I = 1 \text{ А}$), действует максимальный вращающий момент, $M_0 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Направление магнитной индукции в данной точке поля совпадает с направлением от южного к северному полюсу свободной магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля (с направлением положительной нормали к плоскости рамки с током, находящейся в этой же точке магнитного поля) (рис. 3.3).

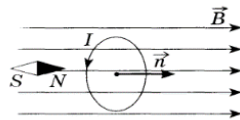


Рис. 3.3

Направление индукции \vec{B} магнитного поля прямолинейного проводника с током совпадает с направлением вращения головки правого винта, если движение острия самого винта совпадает с направлением тока в проводнике (рис. 3.4а).

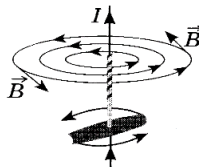


Рис. 3.4 а

Направление индукции \vec{B} магнитного поля в центре кругового витка с током совпадает с направлением движения острия правого винта, головка которого вращается в направлении тока в витке (рис. 3.4б).

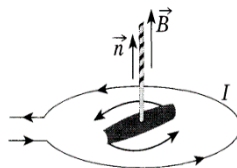


Рис. 3.4 б

Участок поверхности намагниченного образца (магнита), на котором нормальная к поверхности составляющая намагниченности отлична от нуля, называют **магнитным полюсом**. Северным магнитным полюсом называют участок, из которого выходят линии магнитной индукции, а участок, в который входят эти линии южным магнитным полюсом (рис. 3.5).

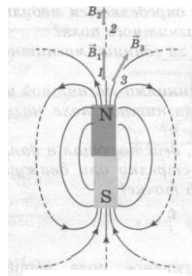


Рис. 3.5

Поэтому плоский виток, направление тока в котором противоположно направлению движения часовой стрелки, эквивалентен северному полюсу постоянного магнита, а виток, направление тока в котором совпадает с направлением движения часовой стрелки, эквивалентен южному полюсу постоянного магнита (рис. 3.6).

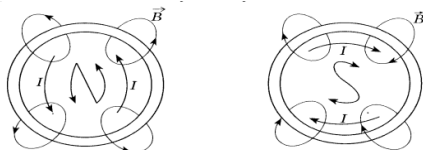


Рис. 3.6

3.2. Линии магнитной индукции

Графически магнитное поле изображается с помощью линий индукции. *Линией индукции* магнитного поля называют воображаемую непрерывную линию в магнитном поле, касательная к которой совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля в каждой точке поля (рис. 3.7).

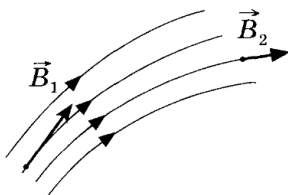


Рис. 3.7

В отличие от линий напряженности электростатического поля, линии индукции магнитного поля всегда замкнуты. Вследствие этого работа в магнитном поле зависит от формы траектории заряда и в случае его движения по замкнутой траектории не равна нулю, то есть магнитное поле не является потенциальным.

Замкнутость линий магнитной индукции означает, что магнитное поле не имеет источников, то есть в природе нет магнитных зарядов, подобных электрическим.

Через каждую точку поля проходит только одна линия магнитной индукции, поэтому линии магнитной индукции не пересекаются.

Магнитное поле, модуль и направление, индукции которого во всех точках одинаковы, называется *однородным*. Линии индукции однородного поля параллельны (рис. 3.8).

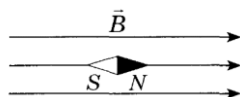


Рис. 3.8

Индукция магнитного поля, созданного несколькими проводниками с электрическими токами (или движущимися зарядами) в любой точке поля, равна векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых в этой точке каждым из проводников с током в отдельности. Это утверждение называют *принципом суперпозиции* магнитных полей. Согласно принципу суперпозиции:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

В табл. 3.1 приведены значения индукции магнитных полей для некоторых физических объектов.

Таблица 3.1

Значения индукции магнитных полей

Магнитные поля в природе и технике	
Область существования и метод получения магнитного поля	Индукция, Тл
Нейтронные звезды, пульсары	10^8
Внутри атома	10^5
Звезды	10^4
Наибольшее значение, полученное в лаборатории при сжатии магнитного потока	10^3
Разряд конденсаторной батареи на импульсный соленоид	10^2
Радиогалактики	10^2
Сверхпроводящие соленоиды	30
Электромагниты	10
Солнце	$10^{-4} \div 10^{-1}$
Земля	$(2 \div 5) \cdot 10^{-5}$
Межпланетное пространство	10^{-8}
Сердце человека	10^{-10}
Межзвездная среда	10^{-12}
Мозг человека	10^{-13}
Достигнутый предел измерений	10^{-18}

3.3. Магнитное поле проводников с током

3.3.1. Прямолинейный проводник

Модуль индукции магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника, сила тока в котором I , на расстоянии r от его оси определяем по формуле

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды – безразмерная физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль индукции B магнитного поля в веществе отличается от модуля индукции B_0 того же магнитного поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

В зависимости от значения μ все вещества можно разделить на диамагнетики ($\mu < 1$), парамагнетики ($\mu > 1$) и ферромагнетики ($\mu \gg 1$).

Для проводника конечных размеров приведенная выше формула будет справедлива только для тех точек поля, расстояние от которых до

проводника значительно меньше, чем расстояния от этих точек до концов проводника.

3.3.2. Круговой виток

Модуль индукции магнитного поля в центре кругового витка радиусом R , сила тока в котором I определяем по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}.$$

3.3.3. Соленоид

Соленоид (греч. solen – трубка и eidos – вид) – катушка индуктивности, обычно в виде намотанного на цилиндрическую поверхность изолированного проводника (рис. 3.9), концы которого подключают к источнику электрического тока. Если длина соленоида гораздо больше радиуса его витков, то магнитное поле внутри соленоида с током можно считать однородным.

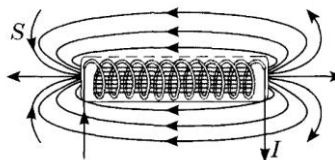


Рис. 3.9

Модуль индукции магнитного поля однослойного соленоида, сила тока в обмотке которого I , на его оси $B = \mu \mu_0 n I$, где μ – магнитная проницаемость сердечника соленоида, $n = \frac{N}{l}$ – число витков на единицу длины соленоида (N – общее число витков, l – длина соленоида).

Модуль вектора индукции магнитного поля на концах соленоида:

$$B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n I.$$

3.4. Сила Ампера

Сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током, называется силой Ампера.

Модуль силы (*сила Ампера*) рассчитывается по формуле:

$$F_A = B I l \sin \alpha,$$

где B – модуль индукции магнитного поля; I – сила тока в проводнике; l – длина активной части проводника; α – угол между направлениями индукции магнитного поля и тока в проводнике.

Направление силы Ампера определяется по *правилу левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы нормальная к проводнику составляющая индукции магнитного поля \vec{B} входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на 90° в плоскости ладони

большой палец покажет направление силы Ампера, действующей на проводник с током (рис. 3.10). Следовательно, сила, действующая на проводник с током, со стороны магнитного поля, не является центральной.

При перемещении проводника с током на расстояние Δx в направлении действия силы Ампера она совершает работу $A = BIl\Delta x = I\Phi$, где Φ – магнитный поток, пересекаемый проводником.

Модуль силы взаимодействия двух расположенных на расстоянии d друг от друга тонких параллельных проводников длиной l каждый, силы тока в которых I_1 и I_2 , определяется выражением $F = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d}$,

$$\frac{F}{l} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi}. \text{ Если } I_1 = I_2 = 1\text{А, } al = 1\text{м, то } \frac{F}{l} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

В СИ по взаимодействию параллельных проводников с током определяется единица тока 1 А, а через ампер – единица заряда кулон.

3.5. Сила Лоренца

Силой Лоренца называют силу, действующую на частицу, имеющую электрический заряд, которая движется во внешнем электромагнитном поле. Выражение для силы Лоренца было получено в конце XIX в. путем обобщения опытных данных. В СИ сила Лоренца F определяется выражением $\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]$, где \vec{E} – напряженность электрического поля, \vec{B} – индукция магнитного поля, q – модуль заряда частицы, \vec{v} – ее скорость относительно системы отсчета, в которой вычисляются величины \vec{F} , \vec{E} и \vec{B} . Первое слагаемое в формуле для расчета силы Лоренца характеризует воздействие электрической составляющей поля, а второе – воздействие магнитной составляющей поля на частицу.

Модуль силы Лоренца, действующей на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле:

$$F_L = qvB \sin \alpha,$$

где q – модуль заряда частицы, v – модуль вектора скорости, B – модуль индукции магнитного поля, α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

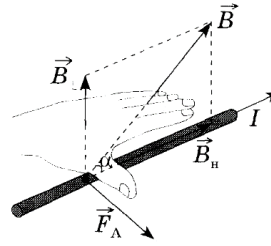


Рис. 3.10

Направление силы Лоренца \vec{F}_L действующей на положительно заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, определяется по **правилу левой руки**. Согласно правилу, если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к скорости положительно заряженной частицы составляющая вектора индукции \vec{B} вошла в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление движения частицы, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на эту частицу (рис. 3.11).

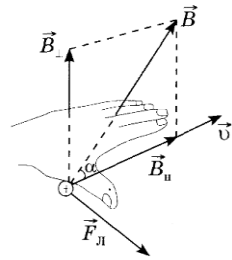


Рис. 3.11

Если заряд частицы отрицательный, то для определения направления силы Лоренца можно пользоваться тем же правилом, но в этом случае вектор силы Лоренца будет направлен противоположно отогнутому на 90° большому пальцу левой руки.

Направление силы Лоренца всегда перпендикулярно к векторам \vec{v} и \vec{B} .

!Сила Лоренца сообщает движущемуся заряду только центростремительное ускорение. Она не изменяет модуль скорости заряда и не совершает работу.

Поскольку сила Лоренца направлена под углом 90° к скорости движения заряженной частицы в каждой точке траектории, то работа этой силы при движении заряженной частицы в магнитном поле равна нулю. Поэтому кинетическая энергия частицы, движущейся в магнитном поле, не изменяется, то есть магнитное поле нельзя использовать для ускорения заряженных частиц.

3.6. Движение заряженных частиц в магнитном поле

Под действием силы Лоренца частицы, имеющие электрический заряд, движутся в магнитном поле по криволинейным траекториям.

Возможны три случая движения заряженных частиц в магнитном поле.

1. В заданной инерциальной системе отсчета вектор скорости \vec{v} заряженной частицы параллелен вектору магнитной индукции \vec{B} , то есть угол α между векторами \vec{v} и \vec{B} равен нулю или 180° .

В этом случае $\sin \alpha = 0$, сила Лоренца также равна нулю, а заряженная частица движется в магнитном поле вдоль линий магнитной индукции, равномерно и прямолинейно.

2. Если в заданной инерциальной системе отсчета вектор скорости \vec{v} заряженной частицы перпендикулярен к вектору магнитной индукции \vec{B} ($\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$), то частица движется в магнитном поле по окружности (дуге-окружности) в плоскости, перпендикулярной вектору магнитной индукции (рис. 3.12).

Модуль силы Лоренца $F_L = qvB$ постоянен, а ее направление перпендикулярно к траектории частицы.

Если $F_L \gg mg$, где m – масса частицы, то, согласно второму закону Ньютона, $F_L = ma_{ц} \Rightarrow qBv = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{qB}$, где $R = \frac{mv}{qB}$ – радиус этой окружности. Период вращения частицы в магнитном поле $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$.

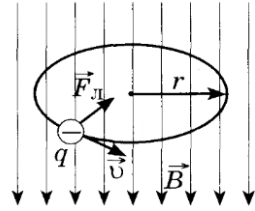


Рис. 3.12

$$\text{Частота вращения частицы } \nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}.$$

$$\text{Угловая скорость частицы } \omega = 2\pi\nu = \frac{qB}{m}.$$

3. Если заряженная частица влетает в магнитное поле так, что направление ее скорости \vec{v} образует с индукцией магнитного поля \vec{B} угол α (причем $\alpha \neq 0, \alpha \neq \pi$), то движение частицы можно представить в виде суммы двух движений:

а) равномерного прямолинейного движения вдоль поля со скоростью $v_1 = v \cdot \cos \alpha$;

б) равномерного движения по окружности со скоростью $v_1 = v \cdot \sin \alpha$.

Траектория движения частицы представляет собой винтовую линию (рис. 3.13), ось которой параллельна вектору магнитной индукции.

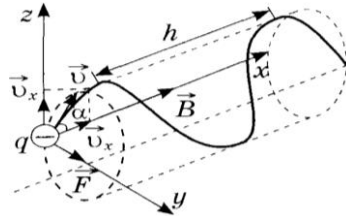


Рис. 3.13

Радиус винтовой линии:

$$R = \frac{mv_1}{qB} = \frac{mv \sin \alpha}{qB}.$$

$$\text{Период вращения: } T = \frac{2\pi R}{v_1} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Шаг винтовой линии (расстояние, которое проходит частица вдоль оси винтовой линии за время, равное периоду вращения),

$$h = v_{\parallel} T = v \cos \alpha T = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB} = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha.$$

Если заряженная частица одновременно движется в магнитном и электрическом полях, то на нее, кроме магнитной составляющей силы Лоренца, действует еще ее электрическая составляющая $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$.

Магнитный поток

Магнитным потоком (Φ) через какую-либо поверхность, охватываемую некоторым плоским контуром, называют физическую скалярную величину, равную произведению модуля индукции магнитного поля и площади проекции данной поверхности на плоскость, перпендикулярную линиям индукции этого поля (рис. 3.14).

Магнитный поток Φ , через плоскую поверхность площадью ΔS определяется по формуле:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS_0,$$

где B – модуль индукции магнитного поля; S – площадь контура; α – угол между направлением индукции магнитного поля \vec{B} и нормалью к поверхности контура.

Изменить магнитный поток, пронизывающий проводящий контур, можно изменяя: а) индукцию магнитного поля, в котором находится контур; б) площадь этого контура; в) ориентацию контура в магнитном поле.

Единица магнитного потока в СИ $[\Phi] = 1 \text{ Вб (вебер)}$ (по имени немецкого физика В. Э. Вебера).

1 Вебер – это магнитный поток, который создается однородным магнитным полем с индукцией $B = 1 \text{ Тл}$ через площадку площадью $S = 1 \text{ м}^2$, расположенную перпендикулярно к полю.

Потоко сцеплением называют полный магнитный поток ψ , пронизывающий проводящий контур (все витки катушки индуктивности, рамки и т. п.); магнитный поток, «сцепленный» со всеми витками контура.

Полный магнитный поток (потоко сцепление), пронизывающий все витки катушки, находящейся в магнитном поле $\Psi = N\Phi = NBS \cos \alpha$, где N – общее число витков катушки, Φ – магнитный поток, пронизывающий один виток, S – площадь одного витка.

Так как линии магнитной индукции замкнуты, то магнитный поток через любую замкнутую поверхность всегда равен нулю.

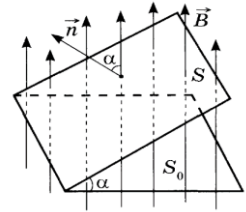


Рис. 3.14

3.8. Закон электромагнитной индукции

Электромагнитная индукция – возникновение электрического поля, электрического тока или электрической поляризации при измене-

нии во времени магнитного поля или при движении материальных сред в магнитном поле.

Явление электромагнитной индукции открыто М. Фарадеем (M. Faraday) в 1831 г. и независимо от его Дж. Генри (J. Henry) в 1832 г.

В 1833 г. Э. Х. Ленц установил универсальное правило для определения знака ЭДС электромагнитной индукции.

Математическую формулировку закона Фарадея дал в 1845 г. Ф. Нейман (F. Neumann).

Различают два типа эффектов, обусловленных электромагнитной индукцией. Каждому из этих типов соответствует экспериментально установленные законы электромагнитной индукции.

- Наведение вихревого электрического поля $\vec{E}(r, t)$, электрического тока или электрической поляризации переменным магнитным полем $\vec{B}(r, t)$.

1. ЭДС индукции, возникающая в неподвижном проводящем контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур: $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ (Дж. Максвелл).

- Наведение вихревого электрического поля $\vec{E}(r, t)$, электрического тока или электрической поляризации при движении материальных сред в магнитном поле.

2. ЭДС индукции, возникающая в проводнике, движущемся в магнитном поле, прямо пропорциональна модулю индукции \vec{B} магнитного поля, длине l активной части проводника, скорости \vec{v} проводника и синусу угла α между направлением поля и направлением движения проводника: $\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha$ (М. Фарадей).

Подчеркнем, что обе формулировки закона математически эквивалентны друг другу, но физические механизмы возникновения ЭДС в обоих случаях различные.

Среднее значение ЭДС индукции, возникающей в проводящем контуре, $\langle \mathcal{E}_i \rangle = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, где $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ -изменение магнитного потока, $\Delta t = t_2 - t_1$ - промежуток времени, в течение которого изменялся магнитный поток; $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ - средняя скорость изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

Знак « \leftarrow » в уравнении отражает правило Ленца.

Изменяющийся магнитный поток можно получить, используя переменное магнитное поле (изменяя B), изменяя геометрию контура

ра (изменяя S) или ориентацию контура в пространстве (изменяя угол α).

Возможно и одновременное изменение всех указанных величин. В этом случае $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = B_2 S_2 \cdot \cos \alpha_2 - B_1 S_1 \cdot \cos \alpha_1$.

ЭДС индукции, которая возникает в неподвижном проводящем контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле, равна отношению работы вихревого электрического поля по перемещению заряда по этому контуру к значению заряда.

Значение ЭДС индукции \mathcal{E}_i не зависит от того, каким способом осуществляется изменение магнитного потока.

Если контур, в котором индуцируется ЭДС, состоит из N витков, то ЭДС индукции определяется формулой:

$$\langle \mathcal{E}_i \rangle = - \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} - N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий один виток.

Если проводящий контур замкнут, то ЭДС индукции создает в нем индукционный ток, среднее и мгновенное значения которого соответственно равны $\langle I \rangle = \frac{\langle \mathcal{E}_i \rangle}{R}$, $I = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$, где R – сопротивление проводящего контура.

$$\langle I \rangle = \frac{\langle \mathcal{E}_i \rangle}{R} = - \frac{\Delta\Psi}{R\Delta t} = -N \frac{\Delta\Phi}{R\Delta t}$$

Заряд Δq , переносимый индукционным током,

$$\Delta q = \langle I \rangle \Delta t = - \frac{\Delta\Psi}{R} = -N \frac{\Delta\Phi}{R}.$$

Из последнего выражения следует, что Δq не зависит от промежутка времени, в течение которого происходило изменение полного магнитного потока, а определяется только его начальным Φ_1 и конечным Φ_2 значениями.

Направление индукционного тока в замкнутом контуре при его движении во внешнем магнитном поле, а также при деформации контура и (или) изменении магнитного поля во времени (последние обобщения не принадлежат Ленцу и введены позже), определяется по правилу Ленца.

Правило Ленца (по имени русского физика Э. Х. Ленца) установлено ученым в 1834 г. при уточнении закона электромагнитной индукции, открытого М. Фарадеем (M. Faraday) в 1831 г. Согласно правилу Ленца, **индукционный ток всегда имеет такое направление, что созданный им магнитный поток противодействует изменению того магнитного потока, который создал этот ток.**

Это означает, что при возрастании магнитного потока Φ вектор индукции магнитного поля индукционного тока \vec{B}_i направлен противо-

положно вектору индукции внешнего магнитного поля \vec{B} (рис. 3.15а), а при убывании Φ вектор индукции магнитного поля индукционного тока \vec{B}_i сонаправлен с вектором индукции внешнего магнитного поля \vec{B} (рис. 3.15б).

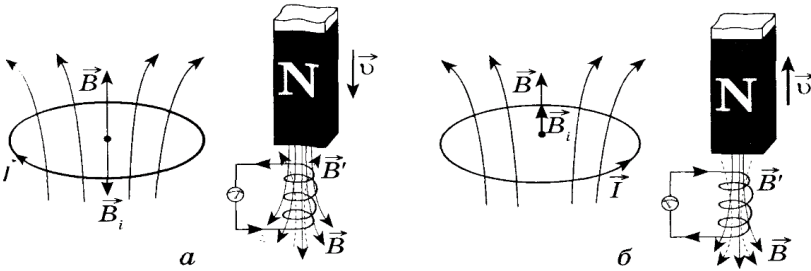


Рис. 3.15

Направление индукционного тока в движущемся проводнике удобнее определять по *правилу правой руки*, которое является частным случаем правила Ленца. Согласно этому правилу, **если правую руку расположить так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь, а отогнутый под прямым углом большой палец совпадал с направлением движения проводника, то четыре пальца, вытянутые вдоль проводника, покажут направление индукционного тока.**

3.9. Механизмы возникновения ЭДС индукции

Закон электромагнитной индукции в формулировке Максвелла (ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока, взятой с противоположным знаком) выполняется как в случае, когда магнитный поток изменяется за счет изменения магнитного поля, пронизывающего неподвижный проводящий контур, так и в случае, когда поток изменяется за счет движения частей этого контура в постоянном магнитном поле.

В обоих случаях (поле изменяется – контур неподвижен; контур движется – поле не изменяется) среднее значение ЭДС индукции $\langle \mathcal{E}_i \rangle = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, а ее мгновенное значение $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Хотя значение ЭДС индукции и не зависит от способа изменения магнитного потока, механизмы ее возникновения при этом оказываются разными.

Если магнитный поток меняется вследствие движения проводящего контура в постоянном магнитном поле, то разделение разноименных

зарядов в проводнике происходит под действием составляющей силы Лоренца, направленной параллельно участкам контура, которая в данном случае является сторонней силой. Под действием этой составляющей силы Лоренца положительные заряды накапливаются на одном конце проводника, а отрицательные заряды – на другом. Это происходит до тех пор, пока составляющая силы Лоренца не будет скомпенсирована силами электростатического поля, создаваемого этими зарядами внутри проводника. Так возникает разность потенциалов, которая при разомкнутой цепи равна ЭДС индукции.

Если неподвижный контур находится в переменном магнитном поле, то изменяющееся во времени магнитное поле возбуждает в контуре вихревое электрическое поле (**индуцированное электрическое поле**). Под действием этого поля происходит перераспределение разноименных электрических зарядов, вследствие чего возникает ЭДС индукции.

Отметим, что индуцированное электрическое поле:

– создается не зарядами, распределенными в пространстве, а переменным магнитным полем;

– является вихревым и не потенциальным полем. Работа, совершаемая в этом поле при перемещении единичного заряда по замкнутой траектории, не равна нулю и численно равна ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре.

Универсальная общность отвлеченного от свойств конкретных материальных сред соотношения $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$, которое иногда тоже называют законом Фарадея, была понята Дж. К. Максвеллом в 1864 г. Им же предсказан дополнительный к электромагнитной индукции эффект – наведение магнитного поля переменным электрическим полем. Открытие электромагнитной индукции и магнитоэлектрической индукции привело к формированию представления о едином материальном электромагнитном поле, компонентами которого являются электрическое и магнитное поля.

3.10. Явление самоиндукции. Индуктивность

Самоиндукция является частным случаем явления электромагнитной индукции.

Самоиндукцией называют явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре (электрической цепи) в результате изменения силы тока в этом контуре (открыто независимо Дж. Генри (J. Henry) в 1832 г. и М. Фарадеем (M. Faraday) в 1835 г.). Появляющуюся при этом электродвижущую силу называют ЭДС самоиндукции.

Электрический ток I , который проходит по замкнутому проводящему контуру, создает в пространстве вокруг этого контура собственное магнитное поле.

Собственный магнитный поток Φ_c этого поля через поверхность, ограниченную названным контуром, пропорционален силе тока I в контуре $\Phi_c = LI$, где L – индуктивность (коэффициент самоиндукции) контура.

Если сила тока в проводящем контуре изменяется, то изменяется и магнитный поток, созданный этим током.

По закону электромагнитной индукции, среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении его собственного магнитного потока $\langle \mathcal{E}_c \rangle = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}$. Если индуктивность L контура постоянная (не изменяются форма контура, его размеры и магнитная проницаемость среды, в которой находится контур), то $\langle \mathcal{E}_c \rangle = -L \left\langle \frac{\Delta I}{\Delta t} \right\rangle$, где $\Delta I = (I_2 - I_1)$ – изменение силы тока в контуре; $\Delta t = (t_2 - t_1)$ – время его изменения; L – индуктивность контура; $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ – средняя скорость изменения силы тока.

Мгновенное значение ЭДС самоиндукции в общем случае определяют по формуле:

$$\mathcal{E}_c = -\frac{d}{dt}(LI) = -L \frac{dI}{dt} - I \frac{dL}{dt}.$$

Индуктивность (лат. induction – наведение, побуждение) – количественная характеристика связи между магнитным потоком самоиндукции электрической цепи и силой электрического тока в этой цепи; параметр электрической цепи, определяющий значение ЭДС самоиндукции, наводимой в цепи при изменении проходящего по ней тока и (или) при ее деформации.

Индуктивность L – это физическая величина, численно равная собственному магнитному потоку Φ_c , пронизывающему контур, при силе тока в контуре $I = 1$ А ($L = \frac{\Phi_c}{I}$).

Основной единицей индуктивности в СИ является генри. 1 Гн – индуктивность проводящего контура, с которым при силе постоянного тока в нем 1 А сцепляется магнитный поток, $\Phi_c = 1$ Вб.

Индуктивность L зависит от размеров и формы проводящего контура, а также от магнитных свойств среды, в которой он находится.

Индуктивность соленоида

Индуктивность однослойного соленоида (см. рис. 3.9) определяют по формуле:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S = n^2 V,$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника; μ_0 – магнитная постоянная; N – число витков в обмотке соленоида; l – длина соленоида; S – площадь поперечного сечения соленоида; $n = \frac{N}{l}$ – число витков на единицу длины; $V = S \cdot l$ – объем соленоида.

3.11. Энергия и плотность энергии магнитного поля

Энергия магнитного поля, созданного током I , проходящим по замкнутому проводящему контуру индуктивностью L , определяется по формуле

$$W_i = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi_c^2}{2L} = \frac{\Phi_c I}{2}.$$

Энергия магнитного поля (как и энергия электрического поля) распределена по всему объему пространства, в котором оно существует.

Энергию магнитного поля, заключенную в единице объема пространства, называют объемной плотностью энергии магнитного поля $\omega = \frac{W_M}{V}$. Согласно теории Максвелла, плотность энергии магнитного поля $\omega = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}$, где B – модуль индукции магнитного поля; μ – магнитная проницаемость среды; μ_0 – магнитная постоянная.

Следовательно, энергия магнитного поля $W_M = \frac{B}{2\mu_0\mu} V$.

Поскольку электрическое и магнитное поля являются частями единого электромагнитного поля, то плотность энергии электромагнитного поля $\omega = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{(2\mu_0\mu)}$, где $\frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2}$ – плотность энергии электрического поля.

Тренировочные упражнения для закрепления теоретического материала

1. Методические указания по решению задач

В задачах, относящихся к данной теме, рассматриваются основные закономерности и особенности электромагнитных явлений, которые происходят в простейших физических системах. Эти явления специфичны, поэтому в процессе анализа конкретных ситуаций особое внимание необходимо обратить на раскрытие механизма взаимодействия магнитного поля с рассматриваемой физической системой, а также на его физическую интерпретацию.

Решение задач данной темы, наряду с использованием основных законов электромагнетизма, предполагает также использование законов механики, термодинамики и постоянного тока.

В зависимости от вида и способа описания физических систем, используемых для определения физических величин, характеризующих электромагнитные явления и процессы, задачи по данной теме условно можно разделить на следующие группы:

1. Задачи на расчет магнитных полей, созданных проводниками с током или движущимися заряженными частицами.
2. Задачи, в которых рассматривается силовое действие магнитного поля на проводники с током или электрические заряды.
3. Задачи на применение закона электромагнитной индукции в комбинации с кинематико-динамическим способом описания рассматриваемой физической системы.
4. Задачи на применение закона электромагнитной индукции в комбинации с энергетическим способом описания рассматриваемой физической системы.

2. Примеры решения задач

Задача 1. Определите индукцию магнитного поля в центре петли радиусом $R = 20,7$ см (рис. 3.17), находящейся в воздухе и образованной длинным проводником, по которому идет ток силой $I = 10,0$ А.

Дано:	<i>Решение.</i> Согласно принципу суперпозиции, индукция магнитного поля в центре петли (точка O) равна сумме индукций магнитных полей тока в петле и прямолинейной части проводника: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$
$R = 20,7$ см	
$I = 10$ А	
$\vec{B} - ?$	

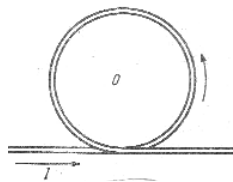


Рис. 3.17

Пользуясь правилом буравчика (правилами правой руки и часовой стрелки) можно определить, что в точке O индукции магнитных полей тока в петле и прямолинейной части проводника направлены перпендикулярно плоскости рисунка к наблюдателю. Таким образом, индукция суммарного магнитного поля также направлена к наблюдателю и проходит через точку O перпендикулярно плоскости рисунка. Следова-

тельно,
$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} + \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = \frac{\mu_0 I}{2R} (1 + \pi).$$

Численно: $B = 0,126 \cdot \text{мТл}$.

Ответ: $B = 0,126 \cdot \text{мТл}$.

Задача 2. Шарик массой m , заряженный положительным зарядом и подвешенный на нити длиной l , движется по окружности в вертикальном однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} . Определите кинетическую энергию шарика, если во время движения нить образует угол α с вертикалью.

Дано:

l

m

B

α

Решение. В качестве тела отсчета выберем лабораторию. Начало координат поместим в ту точку пространства, где находится шарик в рассматриваемый момент времени. Ось Ox направим горизонтально, ось Oy – вертикально вверх. Полученную систему отсчета будем считать инерциальной. Предположим, что точка подвеса покоится относительно рассматриваемой системы отсчета, а нить – невесомая, нерастяжимая и неэлектропроводная.

E – ?

Если пренебречь воздействием на шарик электрического и магнитного полей Земли, а также воздействием воздуха, то движение шарика происходит под действием силы тяжести $m\vec{g}$, силы упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ и силы Лоренца \vec{F}_L , которые обусловлены воздействиями гравитационного поля Земли, нити и внешнего магнитного поля (рис. 3.18).

Следовательно, $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{F}_L$.

Направления всех сил, действующих на шарик, указаны на рис. 3.18 в предположении, что вектор индукции внешнего магнитного поля направлен вертикально вверх и вращение шарика происходит по часовой стрелке.

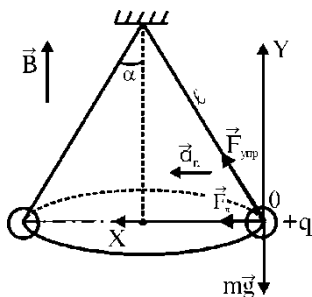


Рис. 3.18

Проецируя векторные величины на оси координат, с учетом двух возможных направлений силы Лоренца (если положительно заряженный шарик движется против часовой стрелки, сила Лоренца направлена против оси Ox), получим:

$$\begin{cases} ma_n = F_{\text{упр}} \sin \alpha \pm F_L, \\ 0 = -mg + F_{\text{упр}} \cos \alpha. \end{cases}$$

Модуль нормального ускорения шарика $a_n = \frac{v^2}{r}$, где v – модуль линейной скорости его движения по окружности, $r = l \sin \alpha$ – радиус этой окружности. Сила Лоренца $F_L = qvB \sin \beta$, где β – угол между векторами \vec{B} и \vec{v} . По условию задачи, $\beta = 90^\circ$, поэтому $F_L = qvB$. Следовательно,

$$\begin{cases} \frac{mv^2}{l \sin \alpha} = F_{\text{упр}} \sin \alpha \pm qvB, \\ F_{\text{упр}} \cos \alpha = mg. \end{cases}$$

Отсюда,

$$\left\{ \frac{mv^2}{l \sin \alpha} = mg \operatorname{tg} \alpha \pm qvB, \text{ откуда } v = \left(\pm \sqrt{\frac{B^2 q^2}{4m^2} + \frac{q}{l \cos \alpha}} \pm \frac{Bq}{2m} \right) l \sin \alpha. \right.$$

Принимая во внимание, что модуль линейной скорости шарика $v > 0$, получим:

$$v = \left(\pm \sqrt{\frac{B^2 q^2}{4m^2} + \frac{q}{l \cos \alpha}} + \frac{Bq}{2m} \right) l \sin \alpha.$$

Следовательно, кинетическая энергия шарика

$$E_k = \frac{ml^2 \sin^2 \alpha}{2} \left(\left(\frac{B^2 q^2}{4m^2} + \frac{q}{l \cos \alpha} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{Bq}{2m} \right).$$

Задача 3. Электрон влетает в продольное однородное магнитное поле со скоростью \vec{v}_0 , направленной под малым углом α к вектору магнитной индукции в точке A . На расстоянии L от точки A расположен экран, плоскость которого перпендикулярна полю. При каких значениях модуля вектора магнитной индукции электрон попадает в точку C , находящуюся на экране?

Дано:

\vec{v}_0
 m
 L
 α

Решение. Ось Ox направим вдоль поля, ось Oy – горизонтально, ось Oz – вертикально вверх. Начало координат поместим в точку A , отсчет времени начнем с момента влета электрона в поле. Выбранную систему отсчета будем считать инерциальной. Предположим, что именно в этой системе отсчета создано магнитное поле и задана скорость электрона. Будем считать, что по отношению к рассматриваемой системе отсчета экран покоится, а движение электрона происходит в вакууме.

$B - ?$

Если пренебречь взаимодействием электрона с гравитационным, электрическим и магнитным полями Земли, а также его собственными электрическим и магнитным полями, то остается воздействие только внешнего магнитного поля, количественной характеристикой которого является сила Лоренца.

При сделанных выше допущениях динамический закон движения электрона в магнитном поле имеет вид: $m\vec{a} = \vec{F}_L$, где m – масса электрона.

Траектория движения электрона в магнитном поле представляет собой винтовую линию (рис. 3.19). Это становится очевидным, если

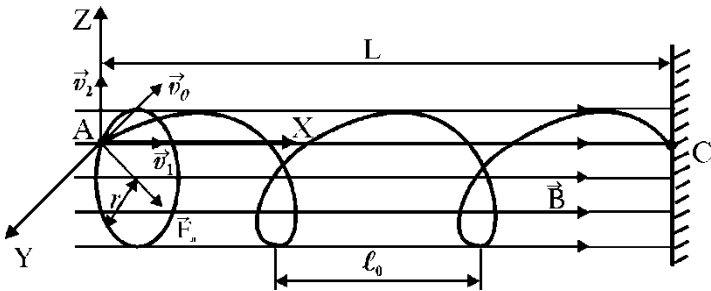


Рис.3.19

вектор скорости электрона \vec{v}_0 представить в виде суммы двух векторов: \vec{v}_1 , направленного вдоль магнитного поля, и \vec{v}_2 , направленного перпендикулярно к полю ($\vec{v}_0 = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$). Сила Лоренца действует на электрон только в плоскости YZ , перпендикулярной к вектору \vec{B} , сообщая ему нормальное ускорение. Поэтому в плоскости YZ электрон будет двигаться по окружности. Так как $\vec{B} = \text{const}$ и $v_2 = \text{const}$, то $ma_n = F_{\text{л}}$. Поскольку $\vec{v}_2 \perp \vec{B}$, то $F_{\text{л}} = ev_2B$, где e – заряд электрона; $a_n = \frac{v_2^2}{r}$, где r – радиус окружности. Следовательно, $\frac{mv_2^2}{r} = ev_2B$. Откуда $r = \frac{mv_2}{eB}$. Из рисунка следует, что $v_2 = v_0 \sin \alpha$, тогда $r = \frac{mv_0 \sin \alpha}{eB}$.

$$\text{Период обращения электрона } T = \frac{2\pi r}{v_2} = \frac{2\pi r}{v_0 \sin \alpha} = \frac{2\pi m}{eB}.$$

Так как проекция силы Лоренца на направление индукции магнитного поля равна нулю, то $\vec{v}_1 = \text{const}$. Проекция вектора \vec{v}_1 на это направление $v_1 = v_0 \cos \alpha$. Поэтому движение электрона вдоль оси OX является равномерным и прямолинейным, то есть $x = v_1 t$.

Сложение равномерного прямолинейного движения вдоль оси OX с движением по окружности в плоскости YZ приводит к тому, что траекторией движения электрона является винтовая линия. Шаг винтовой линии l_0 равен расстоянию, на которое смещается электрон вдоль оси OX за один оборот. Следовательно, шаг винтовой линии:

$$l_0 = v_1 T = \frac{2\pi m}{eB} v_0 \cos \alpha.$$

Электрон сможет попасть в точку C , находящуюся на экране, если за время движения в магнитном поле он сделает полное число оборотов, то есть если будет выполнено условие $t_{\text{дв}} = nT$, где n – целое число.

Поскольку при $t = t_{\text{дв}}$, $x = L$, то $t_{\text{дв}} = \frac{L}{v_1} = \frac{L}{v_0 \cos \alpha}$. Откуда $B = \frac{2\pi m v_0 \cos \alpha}{eL} n$. Угол α мал, поэтому $\cos \alpha \cong 1$. Следовательно, $B = \frac{2\pi m v_0}{eL} n$.

Ответ: $B = \frac{2\pi m v_0}{eL} n$.

Задача 4. В камере ускорителя по окружности постоянного радиуса R движется узкий пучок, состоящий из n протонов, равномерно распределенных по орбите. Магнитный поток через площадь, охватываемую пучком, изменяется со временем по закону $\Phi = \Phi_0(1 + \alpha t)$. В некоторый момент времени сила тока в камере ускорителя равна I_0 . Какой станет сила тока после того, как протоны сделают один оборот?

Дано:

n

R

$$\Phi = \Phi_0(1 + \alpha t)$$

L

I_0

$I - ?$

Решение. В качестве тела отсчета примем ускоритель. За начало отсчета времени примем момент времени, соответствующий току I_0 . Полученную систему отсчета будем считать инерциальной. В качестве физической системы выберем один из протонов пучка. Если пренебречь взаимодействием протона с гравитационным, электрическим и магнитным полями Земли, а также взаимодействием с другими протонами пучка, то изменение его кинетической энергии обусловлено только взаимодействием с магнитным полем.

Изменение кинетической энергии протона обусловлено тем, что изменяющийся магнитный поток, пронизывающий круговой контур, ограниченный пучком протонов, порождает в камере ускорителя вихревое электрическое поле, которое ускоряет протоны. За промежуток времени Δt , равный периоду обращения протона T , вихревое электрическое поле совершает работу $A = e|\mathcal{E}_i|$, где e — заряд протона, $|\mathcal{E}_i| = \frac{\Delta\Phi}{T}$ — ЭДС индукции, $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ — изменение магнитного потока. Подставив значения Φ_1 и Φ_2 , получим:

$$\Delta\Phi = \Phi_0(1 + \alpha(t + T)) - \Phi_0(1 + \alpha t) = \Phi_0\alpha T.$$

Следовательно, $|\mathcal{E}_i| = \alpha\Phi_0$, поэтому работа $A = e\alpha\Phi_0$.

Сила тока в пучке $I = \frac{q}{t} = \frac{nev}{t}$. Поскольку период обращения протонов $T = \frac{2\pi R}{v}$, то $I = \frac{nev}{2\pi R}$. С учетом этого, модуль скорости упорядоченного движения протона $v = \frac{2\pi R}{ne} I$. Поэтому в момент времени $t_0 = 0$ модуль скорости протона $v_0 = \frac{2\pi R}{ne} I_0$, а в момент времени $t_1 = T$ —

$v = \frac{2\pi R}{ne} I$ соответственно. Следовательно, изменение кинетической энергии протона за один оборот $\Delta E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$. Подставив полученные значения скоростей в последнюю формулу, получим: $\Delta E_{\text{кин}} = \frac{2m\pi^2 R^2}{n^2 e^2} (I^2 - I_0^2)$. Согласно теореме об изменении кинетической энергии $\Delta E_{\text{кин}} = A$, следовательно, $\frac{2m\pi^2 R^2}{n^2 e^2} (I^2 - I_0^2) = e\alpha\Phi_0$. Откуда искомое значение силы тока $I = \left(\frac{n^2 e^2 \alpha \Phi_0}{2m\pi^2 R^2} - I_0^2 \right)^{\frac{1}{2}}$.

Проанализируем полученный результат, используя метод предельного перехода.

Если магнитный поток, пронизывающий плоскость орбиты пучка протонов, не изменяется со временем, то есть $\Phi = \text{const}$, то вихревое электрическое поле не возникает. В этом случае скорость протонов, а следовательно, и сила тока в пучке, не должны изменяться. Этот же результат можно получить из формулы для силы тока, положив $\alpha = 0$.

Совпадение теоретического вывода с результатом расчета по формуле, выведенной для силы тока в процессе решения, свидетельствует о том, что задача решена верно.

Ответ: $I = \left(\frac{n^2 e^2 \alpha \Phi_0}{2m\pi^2 R^2} - I_0^2 \right)^{\frac{1}{2}}$.

Задача 5. Верхние концы двух вертикальных медных стержней, отстоящих на расстоянии l друг от друга, замкнуты проводником. По ним без нарушения контакта может скользить перемычка, масса которой m , а сопротивление R_0 . Вся система находится в однородном магнитном поле, вектор индукции которого \vec{B} перпендикулярен плоскости, в которой расположены стержни. Определите установившуюся скорость движения перемычки, если индуктивность единицы длины системы стержней равна L_0 .

Дано:

m
 R_0
 \vec{B}
 L_0
 I_0

Решение. Предположим, что по отношению к инерциальной системе отсчета, связанной с лабораторией, стержни покоятся, а индукция магнитного поля задана именно в этой системе отсчета.

В качестве первой из физических систем рассмотрим «замкнутый проводящий контур», образованный перемычкой, соединительным проводником и отрезками стержней, заключенными между ними; а в качестве второй – «перемычку».

$\vec{v}_0 - ?$

При движении перемычки в контуре возникает ЭДС индукции, а следовательно, и индукционный ток (контур представляет собой за-

мкнутую электрическую цепь), который создает собственный магнитный поток, пронизывающий рассматриваемый контур. При движении переключки индуктивность рассматриваемого контура возрастает, вследствие чего возникает ЭДС самоиндукции, создающая ток самоиндукции, направленный, в соответствии с правилом Ленца, против основного (индукционного) тока.

Поскольку угол между направлением внешнего магнитного поля и направлением движения переключки $\alpha = 90^\circ$, то ЭДС индукции, $\mathcal{E}_i = Blv$ (влиянием магнитного поля Земли пренебрегаем). ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} - I\frac{\Delta L}{\Delta t}$. По условию задачи, $\Delta L = L_0\Delta x$, где Δx – длина вертикальных стержней, измеренная на участке, по которому проходит ток. Поэтому $\frac{\Delta L}{\Delta t} = L_0\frac{\Delta x}{\Delta t} = L_0v$, то есть $\mathcal{E}_c = -IL_0 - L\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Из закона Ома для полной цепи следует, что $IR = \mathcal{E}_i + \mathcal{E}_c$, где R сопротивление рассматриваемого контура. Подставляя значения электродвижущих сил, получим

$$IR = Blv - ILv - L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Если пренебречь сопротивлением соединительного проводника и сопротивлениями стержней, то общее сопротивление контура равно сопротивлению переключки: $R = R_0$.

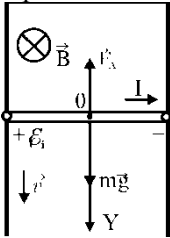


Рис. 3.20

Если пренебречь взаимодействием переключки с воздухом, электрическим и магнитным полями Земли, а также трением между переключкой и стержнями, то ее движение (рис. 3.20) происходит под воздействием силы тяжести $m\vec{g}$, обусловленной взаимодействием с гравитационным полем Земли и силы Ампера $F_A = BIl$, обусловленной взаимодействием с внешним магнитным полем. Следовательно,

$$m\vec{g} = m\vec{a} + \vec{F}_A.$$

В соответствии с правилом Ленца сила Ампера должна быть направлена против силы тяжести. При движении переключки с постоянной скоростью $F_A = mg$. Таким образом, сила тока в цепи $I = \frac{mg}{Bl}$ также постоянна, следовательно, $\Delta I = 0$.

С учетом этого математическая модель ситуации, описанной в задаче, имеет вид:

$$\begin{cases} IR_0 = Blv - IL_0v, \\ mg = BIl. \end{cases}$$

Следовательно, искомая скорость движения переключки

$$v = \frac{mgR_0}{B^2 l^2 - mgL_0}.$$

Проанализируем полученный результат.

Так как модуль скорости движения переключки не может быть отрицательным ($v \geq 0$), то переключка будет двигаться вниз только в том случае, если $B^2 l^2 - mgL_0 \geq 0$. Из закона Ома следует, что сила тока в проводящем контуре $I = \frac{Blv}{R_0 + L_0 v} = \frac{Bl}{L_0 + \frac{R_0}{v}}$ возрастает при увеличении скорости переключки. Однако этот рост ограничен индуктивностью цепи, так как при больших скоростях $\frac{R_0}{v} \rightarrow 0$. Следовательно, максимальное значение силы тока в контуре $I_{max} = \frac{Bl}{L_0}$. С другой стороны, $mg = BIl$. Подставляя значения I_{max} и силы тяжести в последнее неравенство, получим $I \leq I_{max}$. Если это неравенство не выполняется (сила тока в проводящем контуре вследствие ограничений, наложенных на нее явлением самоиндукции, не достигает значения, при котором сила Ампера уравновешивает силу тяжести), то переключка движется в магнитном поле ускоренно.

Заметим, что если сопротивление переключки R_0 очень велико, то неравенство $I \leq I_{max}$ выполнено. Но в этом случае ток в цепи очень мал, то есть $F_A \rightarrow 0$ и переключка движется с ускорением, равным ускорению свободного падения.

И наконец, если $R_0 = 0$, то при выполнении условия $I_{max} > \left(\frac{mg}{l}\right)^{\frac{1}{2}}$ переключка будет неподвижно «висеть» в магнитном поле, несмотря на действие силы тяжести.

3. Задания для самостоятельной работы

3.1. Вопросы к теме «Магнитное поле»

1. Назовите существенные признаки понятия «магнитное поле».
2. Как можно обнаружить магнитное поле в данной точке пространства?
3. Какая физическая величина является силовой характеристикой магнитного поля в каждой его точке?
4. Изобразите схематически линии индукции магнитного поля: а) прямолинейного проводника с током; б) кругового витка с током; в) соленоида с током.
5. Какой вид имеют линии индукции магнитного поля внутри и вне соленоида? Как определить полюсы соленоида?

6. Запишите формулы для расчета модуля индукции магнитного поля: а) длинного прямолинейного проводника с током; б) кругового витка с током; в) соленоида.

7. Сформулируйте правила, по которым определяют направление индукции магнитного поля.

8. Как определить модуль и направление силы, действующей со стороны магнитного поля на а) прямолинейный проводник с током; б) рамку с током в) движущуюся заряженную частицу?

9. Сформулируйте принцип суперпозиции магнитных полей.

10. Как определить модуль и направление силы, действующей со стороны магнитного поля на а) прямолинейный проводник с током; б) рамку с током в) движущуюся заряженную частицу?

11. Определите направление силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле, для случаев, показанных на рис. 3.21.

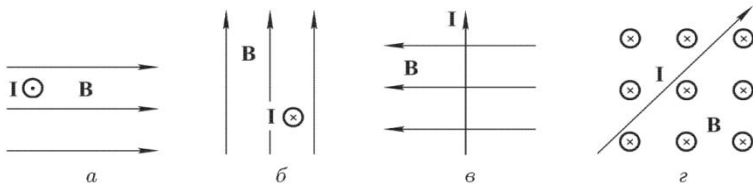


Рис. 3.21

12. На рис. 3.22 схематически изображено магнитное поле кругового витка с током. Где находятся южный и северный магнитные полюсы витка? Однородно ли магнитное поле витка? Почему? В каких точках поля модуль индукции магнитного поля больше?

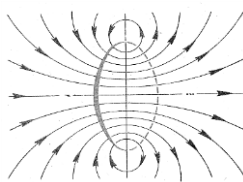


Рис. 3.22

13. Как узнать, намагничено ли старое ножовочное полотно или нет, не пользуясь никакими приборами или другими телами?

14. Как, имея сильный магнит (лучше подковообразный), определить, постоянным или переменным током питается электрическая лампочка?

15. Как узнать, намагничен ли стальной стержень, имея в распоряжении кусок медной проволоки и катушку с нитками?

16. В сочинении французского физика Араго «Гром и молния» приводится много случаев перемагничивания стрелки компаса и намагничивания стальных предметов под действием молнии. Как можно объяснить эти явления?

17. Почему кусок железной проволоки, притянувшись к одному из полюсов подковообразного магнита, притягивается вторым концом к другому полюсу?

18. Будет ли притягивать стальные предметы намагниченная полоса, согнутая в кольцо?

19. Над соленоидом на пружине поочередно подвешивают тонкие стержни из мягкого железа, чугуна, меди. Что произойдет с каждым из стержней, если по обмотке соленоида пропустить постоянный ток?

20. Магнитную стрелку поднесли к шнуру настольной лампы, подключенной к источнику постоянного тока. Окажет ли магнитное поле тока действие на стрелку? Изменится ли действие, если лампа питается переменным током?

21. На рис. 3.23 изображены траектории трех частиц, имеющих одинаковые заряды и массы и влетающих в однородное магнитное поле. Определите знак заряда каждой частицы и объясните причину несовпадения траекторий их движения.

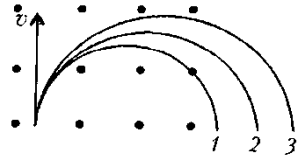


Рис. 3.23

22. Направления скорости движения электрона и силы, действующей на него со стороны поля постоянного магнита, показаны на рис. 3.24. Определите полюса постоянного магнита.

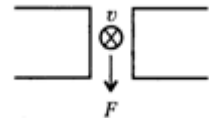


Рис. 3.24

23. Почему сила Лоренца меняет направление скорости движения частицы, но не меняет ее модуль?

24. От чего зависит период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле?

25. На рис. 3.25 показаны направления скорости движения частицы, имеющей заряд q , и силы Лоренца, действующей на частицу со стороны однородного магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости рисунка на наблюдателя. Определите знак заряда частицы.

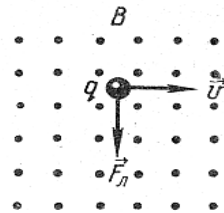


Рис. 3.25

26. Назовите существенные признаки понятия «магнитный поток»; запишите формулу и поясните ее.

27. Какими способами можно изменить магнитный поток через поверхность?

28. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Опишите опыты, в которых обнаруживается явление электромагнитной индукции.

29. Отличается ли индуцированный электрический ток в проводнике от электрического тока, создаваемого любым другим источником, например гальваническим элементом? Отличаются ли сторонние силы, обеспечивающие индукционный ток и ток от гальванического элемента?

30. Шасси автомобиля и оси его колес составляют замкнутый проводящий контур. Индуцируется ли в этом контуре ток при движении автомобиля?

31. Изменится ли сила тока в катушке с постоянным током, если ввести внутрь ее не намагниченный железный стержень?

32. Длинную изолированную проволоку складывают вдвое, наматывают на катушку и присоединяют концы проволоки к гальванометру. Будет ли индуцироваться ток в катушке при введении в нее прямого магнита?

33. Сформулируйте закон электромагнитной индукции. Запишите формулу.

34. При движении полосового магнита относительно катушки, концы которой замкнуты на гальванометр, в цепи возникает индукционный ток. Направления тока на рисунках указано стрелками (рис. 3.26). Определите направление движения магнита в каждом случае.

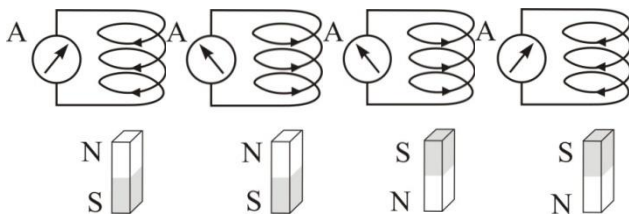


Рис. 3.26

35. Какова природа сторонних сил, вызывающих появление индукционного тока: а) в неподвижном проводящем контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле; б) в проводнике, который движется в постоянном во времени магнитном поле?

36. Сформулируйте правило Ленца и поясните его физический смысл.

37. В каком случае в замкнутом проводящем контуре, находящемся в однородном магнитном поле, будет индуцироваться электрический ток: а) контур движется поступательно; б) контур вращается? Почему?

38. В чем заключается явление самоиндукции? Опишите опыты, в которых обнаруживается это явление. Запишите формулу для расчета ЭДС самоиндукции и поясните ее.

39. Что называют индуктивностью? В каких единицах в СИ она измеряется?

40. Запишите формулы для расчета энергии магнитного поля катушки с током?

3.2. Задачи для самопроверки

1. Модуль индукции магнитного поля, созданного двумя круговыми проводниками с токами, расположенными в вакууме во взаимно перпендикулярных плоскостях так, что их центры совпадают (рис. 3.27) в точке O , составляет $B_0 = 0,20$ мТл. Радиусы круговых проводников одинаковые $R_1 = R_2 = 31,4$ мм. Определите силу тока I_1 в первом проводнике, если сила тока во втором из проводников $I_2 = 6,0$ А.

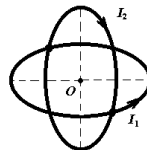


Рис. 3.27

2. На концах железного проводника поперечным сечением $S = 0,05$ мм² поддерживается напряжение $U = 0,48$ В. Проводник находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,01$ Тл. Определите угол α между направлением поля и осью проводника, если на него действует сила, модуль которой $F = 1,0$ мН.

3. Проводящий стержень длиной $l = 0,2$ м и массой $m = 10$ г подвешен на двух легких гибких проводниках длиной $l_1 = l_2 = 0,1$ м в вертикальном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 1$ Тл. На какой угол φ от вертикали отклонятся проводники, если к точкам их закрепления подключить конденсатор емкостью $C = 100$ мкФ, заряженный до напряжения $U = 100$ В.

4. Квадратная рамка массой $m = 10$ г, по которой проходит ток силой $I = 2$ А, может без трения вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через ее центр, параллельно двум противоположным сторонам рамки. Определите период T малых колебаний этой рамки в однородном магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости рамки, если $B = 100$ мТл.

5. Горизонтальные рельсы находятся в вертикальном однородном магнитном поле на расстоянии $L = 0,3$ м друг от друга. На них лежит стержень массой $m = 0,5$ кг, сила тока в котором $I = 50$ А, перпендикулярный рельсам. Какой должна быть индукция \vec{B} поля для того, чтобы стержень начал равномерно двигаться вдоль рельсов, если коэффициент трения скольжения $\mu = 0,2$.

6. Проволочное кольцо радиусом $R = 1$ см, сила тока в котором $I = 2$ А, помещено в магнитное поле, линии индукции которого перпен-

дикулярны плоскости кольца. Определите силы упругости, возникающие в кольце, если модуль индукции магнитного поля $B = 1$ Тл.

7. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U = 1$ кВ, влетает в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1$ мТл перпендикулярно к линиям индукции поля. Определите радиус R траектории и период T обращения электрона в поле.

8. Протон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U = 20$ кВ, влетает в однородное магнитное поле, модуль индукции которого $B = 0,10$ Тл, перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите: радиус R кривизны траектории, угловую скорость ω , нормальное и тангенциальное ускорения a_n и a_τ , протона в магнитном поле.

9. Заряженная частица массой m и зарядом q , пройдя ускоряющую разность потенциалов U_0 , влетает в плоский конденсатор параллельно его пластинам. Расстояние между пластинами d , разность потенциалов U . Какой должна быть индукция однородного магнитного поля, в котором находится конденсатор, чтобы скорости частицы в момент влета и в момент вылета из конденсатора были одинаковыми?

10. Два иона, заряды и кинетические энергии которых одинаковые, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион движется по окружности радиусом $R_1 = 3$ см, а радиус второй окружности – $R_2 = 1,5$ см. Определите отношение массы m_1 первого иона к массе m_2 второго иона.

11. Частица с зарядом $q = 5$ мкКл движется со скоростью, модуль которой $v = 10 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ в положительном направлении оси Ox в однородном магнитном поле, направленном вдоль оси Oy . Определите проекцию силы Лоренца F_x на ось Ox , если модуль индукции магнитного поля $B = 0,1$ Тл.

12. Протон и α -частица влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно к линиям индукции. Во сколько раз период обращения протона больше периода обращения α -частицы?

13. Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции со скоростью, модуль которой $v = 10 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Определите модуль изменения скорости электрона после прохождения им в магнитном поле пути $s = 2$ м, если модуль индукции $B = 0,1$ Тл.

14. В слой однородного магнитного поля толщиной $h = 0,10$ м, модуль индукции которого $B = 0,10$ Тл, по нормали к параллельным плоскостям, ограничивающим поле, и к линиям индукции поля влетает α -частица. Определите модуль скорости частицы, если после прохождения поля она отклонилась на угол $\varphi = 30^\circ$ от первоначального направления движения. Линии индукции параллельны границам поля.

15. Протон влетает в область магнитного поля под углом $\alpha = 60^\circ$ к плоскости, ограничивающей полупространство, занятое полем, и по

нормали к линиям индукции поля, которые параллельны границам поля. Определите модуль индукции B магнитного поля, если протон находился в области поля в течение промежутка времени $\Delta t = 0,5 \cdot 10^{-5}$ с.

16. Электрон, модуль скорости которого $v = 8 \cdot 10^3 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, влетает в однородное магнитное поле под углом $\alpha = 60^\circ$ к направлению линий индукции. Определите радиус R и шаг h винтовой спирали, по которой движется электрон, если модуль индукции магнитного поля $B = 31,4$ мТл.

17. Реактивный самолет, имеющий размах крыльев $L = 50$ м, летит горизонтально со скоростью, модуль которой $v = 800 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Определите разность потенциалов $\Delta \phi$ на концах крыльев самолета, если вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли $B = 50$ мТл.

18. Модуль индукции магнитного поля, перпендикулярного плоскости плоской проводящей рамки площадью $S = 100 \text{ см}^2$, изменяется с течением времени по закону $B = At^2 + Ct^3$, где $A = -3,0 \frac{\text{Тл}}{\text{с}^2}$, $C = 1,0 \frac{\text{Тл}}{\text{с}^3}$. Определите зависимость силы индукционного тока I в рамке от времени t , если сопротивление рамки $R = 0,01$ Ом.

19. Рамка находится в магнитном поле. В течение промежутка времени $\Delta t = 1,6$ с магнитный поток через каждый виток рамки изменился от $\Phi_1 = 98$ мВб до $\Phi_2 = 14$ мВб. Определите число витков N , если среднее значение ЭДС индукции, возникшей в рамке $\langle \mathcal{E} \rangle = 2,6$ В.

20. Модуль индукции магнитного поля, изменяется с течением времени по закону $B = A + Ct$, где $A = 0,15$ Тл, $C = 0,1 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$. Определите максимальное значение ЭДС индукции \mathcal{E}_i в круговом контуре радиусом $r = 5$ см, расположенном в данном поле.

21. Модуль индукции магнитного поля, перпендикулярного плоскости проводящего контура площадью $S = 0,50 \text{ м}^2$, состоящего из четырех резисторов $R_1 = 1,0$ Ом, $R_2 = 2,0$ Ом, $R_3 = 3,0$ Ом, $R_4 = 4,0$ Ом (рис. 3.28), изменяется по закону $B = At$, где A некоторая постоянная. Определите модуль скорости изменения индукции магнитного поля, если сила тока в контуре $I = 0,1$ А.

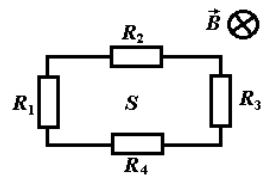


Рис. 3.28

22. Кольцо диаметром $d = 10$ см, изготовленное из гибкого проводника сопротивлением $R = 0,314$ Ом, находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,40$ Тл, направленном перпендикулярно плоскости кольца. Определите заряд q , который пройдет по проводнику, если кольцо, не выводя из собственной плоскости, растянуть во вдвое сложенный отрезок прямой.

23. Из двух одинаковых проводников изготовлены два контура – квадратный и круговой. Оба контура помещены в одной плоскости в однородном изменяющемся во времени магнитном поле. Определите силу тока I_1 , который индуцируется полем в квадратном контуре, если сила тока в круговом контуре $I_2 = 0,4$ А?

24. Катушка индуктивности диаметром $d = 5$ см, содержащая $N = 1000$ витков, подключенная к конденсатору емкостью $C = 10$ мкФ, находится в магнитном поле, вектор индукции которого параллелен оси катушки. Определите заряд q на обкладках конденсатора, если индукция магнитного поля изменяется со скоростью $10 \frac{\text{мТл}}{\text{с}}$.

25. Кольцо, изготовленное из алюминиевой проволоки радиусом $r = 12,5$ см, диаметром $d = 2$ мм, расположено в однородном магнитном поле так, что его плоскость перпендикулярна вектору индукции поля. При какой скорости изменения индукции магнитного поля в кольце возникает индукционный ток $I = 12$ А?

26. Тонкий изолированный медный проводник, концы которого замкнуты, согнут в виде квадрата. Квадрат помещен в однородное магнитное поле, модуль индукции которого $B = 0,10$ Тл так, что его плоскость перпендикулярна линиям индукции поля. Определите заряд q который пройдет по проводнику, если потянув за расположенные на одной диагонали вершины квадрата, превратить проводник в сложенный вдвое прямолинейный отрезок. Масса проводника $m = 1,0$ г, плотность меди $D = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а ее удельное сопротивление $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

27. По горизонтальным рельсам, расположенным в вертикальном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 10$ мТл, скользит проводник длиной $l = 1$ м со скоростью, модуль которой $v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Концы рельсов замкнуты на резистор сопротивлением $R = 2$ Ом. Пренебрегая сопротивлением рельсов и соединительных проводов, определите, какое количество теплоты выделится в резисторе за промежуток времени $\Delta t = 10$ с.

28. Металлическое кольцо радиусом $r = 8$ см и сопротивлением $R = 0,1$ Ом находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 100$ мТл. Кольцо поворачивают в поле на угол $\varphi = 90^\circ$ в течение промежутка времени $\Delta t = 0,1$ с. Определите количество теплоты Q , которое выделится при повороте, если в начальный момент времени линии индукции магнитного поля были направлены перпендикулярно плоскости кольца.

29. Круговой виток радиуса r , изготовленный из проводника, сопротивление единицы, длины которого R_0 , находится в постоянном однородном магнитном поле, вектор индукции которого \vec{B} перпендикулярен плоскости витка. Виток, не выводя из плоскости, превратили в

восьмерку, составленную из двух равных колец. Определите заряд q , прошедший по проводнику.

30. В однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,03$ Тл, перпендикулярно к линиям вектора индукции, расположен круговой медный замкнутый виток массой $m = 20$ г. Определите силу тока I в витке, если в течение промежутка времени $\Delta t = 0,01$ с поле равномерно убывает до нуля.

31. Горизонтальный проводящий стержень массой m и длиной l может скользить без трения по двум вертикальным металлическим направляющим, нижние концы которых замкнуты на конденсатор емкостью C . Определите ускорение стержня, если вся система находится в однородном магнитном поле, индукция которого \vec{B}_0 перпендикулярна плоскости падения стержня.

32. ЭДС самоиндукции, возникающая в проводящем контуре индуктивностью $L = 2$ Гн, изменяется с течением времени по закону:

$\mathcal{E} = (10 - 4t)$ (В). Определите зависимость силы тока в контуре от времени.

33. Катушку с ничтожно малым сопротивлением и индуктивностью $L = 3$ Гн подключают к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 15$ В и ничтожно малым внутренним сопротивлением. Через какой промежуток времени Δt после замыкания цепи сила тока достигнет значения $I = 50$ А?

34. Параллельно соединенные катушка индуктивностью L и резистор сопротивлением R подключают к источнику тока с ЭДС \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r (рис. 3.29). Определите заряд, прошедший через резистор, после замыкания ключа K .

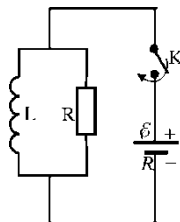


Рис.3.29

35. Проволочная рамка, площадь которой S , сопротивление R и индуктивность L находится в однородном магнитном поле, индукция которого \vec{B}_0 перпендикулярна плоскости рамки. Определите ЭДС индукции \mathcal{E}_i , и выделившееся в рамке количество теплоты Q при мгновенном выключении поля.

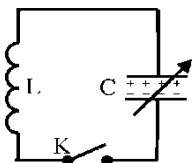


Рис. 3.30

36. В цепи, состоящей из заряженного конденсатора переменной емкости и катушки, индуктивность которой L , замыкают ключ K (рис. 3.30). По какому закону должна изменяться с течением времени емкость конденсатора, чтобы сила тока в цепи нарастала пропорционально времени, если начальная емкость конденсатора C_0 ?

108

37. На катушке сопротивлением $R = 8,2$ Ом поддерживается постоянное напряжение $U = 55$ В. Определите, сколько энергии W выделяется при размыкании цепи катушки, если ее индуктивность $L = 25$ мГн.

38. Зависимость силы тока в катушке индуктивности от времени имеет вид: $I = A + Bt$, где $A = 1,0$ А, $B = -0,20 \frac{\text{А}}{\text{с}}$. Определите индуктивность

L катушки, если ЭДС самоиндукции возникающая в катушке $\mathcal{E} = 20$ мВ.

39. За промежуток времени $\Delta t = 0,5$ с, вследствие уменьшения силы тока в катушке индуктивностью $L = 400$ мГн возникла ЭДС самоиндукции, среднее значение которой $\langle \mathcal{E} \rangle = 12$ В. Определите конечное значение силы тока I_2 в катушке, если в момент времени $t_0 = 0$ сила тока $- I_0 = 20$ А.

На рис. 3.31 приведена зависимость силы тока I в катушке однослойного соленоида с индуктивностью $L = 2$ мГн, от времени. Определите максимальное значение ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{max} , возникающей при этом в катушке.

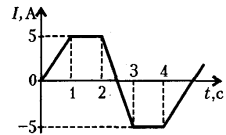


Рис. 3.31

40. Источник тока с ЭДС $\mathcal{E} = 6$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом подключен к катушке, имеющей индуктивность L и сопротивление $R_1 = 2$ Ом. При включении в цепь, параллельно катушке сопротивления $R_2 = R_1$, энергия магнитного поля тока уменьшилась на $\Delta W = 1,75$ Дж. Определите индуктивность катушки L , если индуктивность соединительных проводов пренебрежимо мала.

41. В течение промежутка времени $\Delta t = 0,50$ с сила тока в цепи линейно возрастала от значения $I_1 = 10$ А, до $I_2 = 5,0$ А. Вследствие этого в катушке возникла ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = 2,5$ В. Определите индуктивность L катушки.

42. Тонкое сверхпроводящее кольцо, сила тока в котором $I_0 = 10$ А, вносят в однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости кольца. Модуль индукции магнитного поля $B = 100$ мТл, индуктивность кольца $L = 628$ мкГн. Определите радиус r кольца, если, после внесения его в магнитное поле, сила тока в кольце $I = 15$ А.

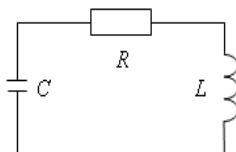
43. Две сверхпроводящие катушки, индуктивности которых $L_1 = 20$ мГн и $L_2 = 40$ мГн, соединены параллельно и подключены к конденсатору, заряженному до напряжения $U = 100$ В. Определите максимальное значение силы тока в первой катушке, если емкость конденсатора $C = 3,0$ мкФ.

РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, а также связанных с ними напряженности электрического и индукции магнитного полей в электрической цепи, называют *электромагнитными колебаниями*.

4.1. Идеальный колебательный контур

Колебательный контур – электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивностью L , конденсатора емкостью C и резистора сопротивлением R (рис. 4.1).



Свободные электромагнитные колебания в контуре – это периодические изменения заряда q , напряжения U на обкладках конденсатора и силы тока I в катушке индуктивности и резисторе.

Колебания в контуре можно возбудить, сообщив конденсатору некоторый начальный заряд или создав в катушке индуктивности электрический ток (например, путем включения внешнего магнитного поля, пронизывающего витки катушки). Процесс колебаний в такой цепи заключается в периодической перезарядке конденсатора под действием ЭДС самоиндукции и в существовании переменного тока

Колебательный контур, активное сопротивление которого $R = 0$ называют **идеальным**.

В идеальном колебательном контуре устанавливаются **незатухающие гармонические колебания**, при которых значения заряда q напряжения U и силы тока I изменяются по следующим законам: $q = q_0 \cos \omega_0 t$,

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0 \cos \omega_0 t}{C} = U_0 \cos \omega_0 t, \quad I = q'(t) = I_0 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad \text{где } q, U, I -$$

мгновенные значения заряда, напряжения и силы тока соответственно;

$q_0, U_0 = \frac{q_0}{C}, I_0 = q_0 \omega$ – амплитудные значения заряда, напряжения и

силы тока соответственно; ω_0 – циклическая частота свободных (собственных) колебаний в контуре. Отметим, что колебания заряда и напряжения совершаются в одной и той же фазе, а колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на конденсаторе на $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Период свободных электромагнитных колебаний в идеальном контуре определяется **формулой Томсона** $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

Частота свободных электромагнитных колебаний

$$\nu_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Полная энергия электромагнитного поля колебательного контура в любой момент времени представляет собой сумму энергии электростатического поля конденсатора $W_{эл} = \frac{q_0^2}{2C} \cos^2 \omega_0 t$ и энергии магнитного

поля катушки $W_{м} = \frac{LI_0^2}{2} \sin^2 \omega_0 t$: $W = \frac{q_0^2}{2C} \cos^2 \omega_0 t + \frac{I_0^2 L}{2} \sin^2 \omega_0 t$. Если

учесть, что $I_0 = q_0 \omega = \frac{q_0}{\sqrt{LC}}$, последнюю формулу можно записать в ви-

де: $W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI_0^2}{2} = const.$

Отметим существенные особенности свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре:

1. При незатухающих колебаниях в контуре происходит непрерывное превращение энергии электростатического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки индуктивности и наоборот. Однако энергия, запасенная в колебательном контуре в начальный момент времени, не изменяется с течением времени.

2. Колебательный контур – это колебательная система, состояние устойчивого равновесия которой соответствует минимуму потенциальной энергии ($q = 0$). Система самопроизвольно возвращается в это состояние (разряд конденсатора) и проходит его по инерции благодаря явлению самоиндукции. Именно поэтому в контуре могут существовать электромагнитные колебания.

3. Изменения силы тока в контуре обусловлены наличием двух полей: потенциального электростатического поля конденсатора и вихревого электрического поля катушки. Причем изменения этих полей происходят так, что в любой момент времени модули напряженности электрического и индукции магнитного полей равны, а их направления противоположны. Если бы это условие не выполнялось, то вследствие равенства нулю активного сопротивления контура сила тока в нем возрастала бы неограниченно (что противоречит закону сохранения энергии).

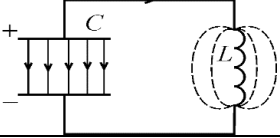
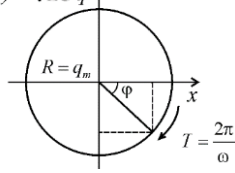
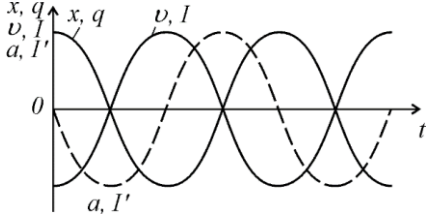
4. Циклическая частота и период собственных электромагнитных колебаний в контуре определяются только параметрами контура и не зависят от начальных условий, то есть от того, каким образом контур получил первоначальный запас энергии.

5. Максимальные значения заряда на обкладках конденсатора и силы тока в катушке определяются первоначальным запасом энергии, переданной контуру.

Основные физические величины и законы колебаний идеального колебательного контура приведены в табл. 4. 1

Таблица 4.1

Физические величины и законы колебаний

Характеристики колебательной системы	Идеальный колебательный контур
Упрощенная схема колебательной системы	
Закон сохранения энергии	$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C} \Rightarrow q^2 + LCI^2 = q_0^2$
Математически преобразованные следствия из закона сохранения энергии	$q^2 + (\sqrt{LC}q')^2 = q_0^2$ – уравнение окружности, $R = q_0$ $y = \sqrt{LC}q'$ 
Выражения для нахождения характеристик колебаний	$q = q_0 \cos \omega t, \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad T = 2\pi\sqrt{LC}$
Графики	

4.2. Реальный колебательный контур

В любом реальном колебательном контуре сопротивление R (активное сопротивление катушки индуктивности и соединительных проводов) всегда отлично от нуля. Поэтому в таком контуре происходят

потери энергии (энергия, сообщенная контуру, расходуется на изменение внутренней энергии контура, излучение электромагнитных волн, переполаризацию диэлектрика, который находится между обкладками конденсатора, и перемагничивание сердечника катушки) и колебания с течением времени затухают.

Циклическая частота, с которой совершаются **затухающие колебания**, меньше частоты ω_0 собственных колебаний.

В общем случае частота затухающих колебаний определяется по

формуле: $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} + \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$. Если $\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC}$, то частота колебаний

становится равной нулю, а период колебаний бесконечно большим. Это

означает, что если активное сопротивление контура $R \geq \sqrt{\frac{4L}{C}}$, то коле-

бания в контуре не возникают, так как вся энергия, накопленная в конденсаторе, рассеивается при одном его разряде.

Поскольку основным видом потерь энергии в контуре являются потери на изменение внутренней энергии, то затухание можно не учитывать, если «тепловые потери» за период во много раз меньше энергии

контура $\left(\frac{1}{2} I_0^2 R T \ll \frac{L I_0^2}{2}\right)$, то есть при условии, что $R \ll \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{C}}$. Если

затухание колебаний незначительно, то для расчета параметров реального контура с достаточно хорошим приближением можно пользоваться теми же формулами, что и для идеального контура. $T = 2\pi\sqrt{LC}$,

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

4.3. Вынужденные электромагнитные колебания

Незатухающие гармонические колебания в реальном колебательном контуре можно получить, если непрерывно пополнять энергию контура. Для этого необходимо включить последовательно с элементами контура переменную ЭДС ($\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$) или, разорвав контур, подать на образовавшиеся контакты переменное напряжение $U = U_0 \sin \omega t$, где U – мгновенное значение напряжения; U_0 – амплитуда напряжения; ω – циклическая частота переменного напряжения (рис. 4.2).

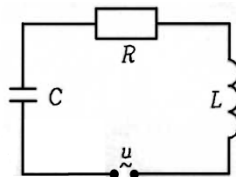


Рис. 4.2

После замыкания цепи в контуре установятся **вынужденные колебания тока**, частота которых совпадает с частотой подаваемого напряжения: $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$, где I – мгновенное значение силы тока I_0 – амплитудное значение силы тока в цепи; φ_0 – сдвиг фаз между током и напряжением в цепи (φ_0 зависит от того, какие элементы входят в состав цепи). Такие *вынужденные колебания называют переменным током*

В общем случае переменный ток – это электрический ток, изменяющийся во времени. В общем понимании к переменному току относят различные виды импульсных, пульсирующих, периодических и квазипериодических токов. В технике под переменным током обычно подразумевают периодические или почти периодические токи переменного направления. Наиболее употребителен переменный ток, сила которого I меняется во времени по гармоническому закону (гармонический, или синусоидальный, переменный ток).

Синусоидальный переменный ток представляет собой вынужденные электромагнитные колебания, происходящие в электрической цепи под действием периодической внешней ЭДС, изменяющейся с течением времени по гармоническому закону.

Машина переменного тока – электрическая машина, преобразующая механическую энергию в электрическую энергию переменного тока (*генератор*), или электрическую энергию переменного тока в механическую энергию (*двигатель*), или электрическую энергию переменного тока в электрическую энергию переменного тока другого напряжения или другой частоты (*преобразователь*).

Принцип действия простейшего генератора синусоидального переменного тока основан на законе электромагнитной индукции.

Пусть рамка площадью S равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} вокруг оси, расположенной в плоскости рамки и перпендикулярной вектору индукции магнитного поля, с угловой скоростью ω (рис. 4.3).

Мгновенное значение ЭДС индукции, возникающей в рамке, $\mathcal{E}_i = -\Phi'(t)$. Поскольку $\Phi = BS \cos \alpha$, где $\alpha = \omega t$ – угол между направлением поля и нормалью к рамке, то $\mathcal{E}_i = -(BS \cos \omega t)' = BS\omega \sin \omega t$. Следовательно, ЭДС индукции изменяется с течением времени по гармоническому закону, причем ее максимальное значение $\mathcal{E}_0 = BS\omega$.

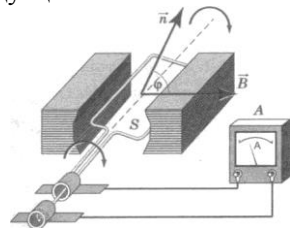


Рис. 4.3

Напряжение в цепи $U = \mathcal{E}_i = U_0 \sin \omega t$ также изменяется по гармоническому закону.

Сила переменного тока в проводнике, из которого изготовлена рамка, определяется в соответствии с законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad I_0 = \frac{U_0}{R}.$$

Действующим значением силы переменного тока I_d называют силу такого постоянного тока, который в том же проводнике и за тот же промежуток времени выделяет такое же количество теплоты, что и данный переменный ток.

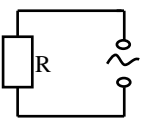
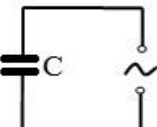
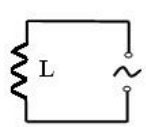
По закону Джоуля–Ленца тепловая мощность в цепи постоянного тока $P = I_{\text{п}}^2 R$, а в цепи переменного тока $\langle P \rangle = \frac{I_0^2 R}{2} = I_d^2 R$. Поскольку

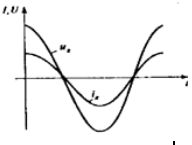
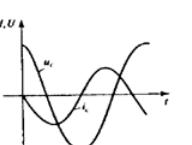
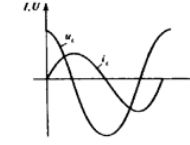
$P_{\text{п}} = \langle P \rangle$, то действующее значение силы тока в цепи переменного тока связано с его максимальным значением отношением $I_d = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ (табл. 4.2).

Действующим значением напряжения переменного тока U_d называют напряжение такого постоянного тока, который в том же проводнике и за то же время выделяет такое же количество тепла, что и данный переменный ток. Действующее значение напряжения определяется по формуле: $U_d = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

Таблица 4.2

Цепи переменного тока и их особенности

№ п/п	Характеристика цепи	Типы сопротивления		
		активное	емкостное	индуктивное
1	Упрощенная схема			
2	Мгновенные значения: а) напряжения; б) силы тока	$U = U_0 \cdot \cos \omega t$ $I = I_0 \cdot \cos \omega t$	$U = U_0 \cdot \cos \omega t$ $I = I_0 \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$	$U = U_0 \cdot \cos \omega t$ $I = I_0 \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$

№ п/п	Характеристика цепи	Типы сопротивления		
		активное	емкостное	индуктивное
3	График Его пояснение	 <p>Колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения</p>	 <p>Колебания силы тока опережают колебания напряжения на $\frac{\pi}{2}$</p>	 <p>Колебания силы тока отстают от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$</p>
4	Сопротивление	<p>При небольших частотах R совпадает с сопротивлением цепи постоянного тока. При больших частотах с ростом ω увеличивается. «Пропускает» переменный и постоянный ток</p>	<p>X_C зависит от частоты переменного тока и емкости конденсатора C: $X_C = \frac{1}{\omega C}$ «Пропускает» переменный ток и не «пропускает» постоянный</p>	<p>Сопротивление X_L зависит от частоты переменного тока и индуктивности катушки L: $X_L = \omega L$ «Пропускает» переменный и постоянный ток</p>
5	Закон Ома	Выполняется и для мгновенных, и для амплитудных значений		
		$I = \frac{U}{R}$ $I_0 = \frac{U_0}{R}$	$I = \frac{U}{X_C}$ $I_0 = \frac{U_0}{X_C}$	$I = \frac{U}{X_L}$ $I_0 = \frac{U_0}{X_L}$
6	Амплитудное значение силы тока и напряжения	$I_0 = \frac{U_0}{R}$ $U_0 = I_0 R$	$I_0 = U_0 \omega C$ $U_0 = \frac{I_0}{\omega C}$	$I_0 = U_0 \omega L$ $U_0 = \frac{I_0}{\omega L}$
7	Энергия	Энергия тока может превращаться		
		во внутреннюю энергию	в энергию электрического поля	в энергию магнитного поля

4.4. Трансформатор

Трансформатором называют электромагнитный аппарат, который предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте тока.

Трансформаторы, увеличивающие напряжение переменного тока, называют *повышающими*, а уменьшающие напряжение – *понижающими*. Принцип действия трансформаторов основан на явлении электромагнитной индукции.

Трансформатор состоит из одной первичной обмотки и одной или нескольких вторичных обмоток, которые расположены на общем магнитопроводе, набранном из листовой трансформаторной стали, и индуктивно связаны между собой.

Схема простейшего трансформатора показана на рис. 4.4 (1 и 2 – первичная и вторичная обмотки; 3 – магнитопровод; Φ_0 – основной магнитный поток; Φ_1 и Φ_2 – потоки рассеивания; I_1 и I_2 – действующие значения сил токов в первичной и вторичной обмотках соответственно; U_1 – действующее значение напряжения на первичной обмотке; U_2 – действующее значение напряжения на нагрузке; R_H – сопротивление нагрузки).

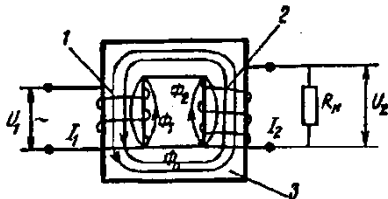


Рис. 4.4

Коэффициент трансформации, k – физическая безразмерная величина, введенная для количественного оценивания различия амплитудных (действующих) значений напряжения между концами первичной и вторичной обмоток трансформатора и равная отношению числа витков N_1 первичной обмотки трансформатора к числу витков N_2 вторичной обмотки: $k = \frac{N_1}{N_2}$.

Трансформаторы, у которых вторичная обмотка имеет большее число витков, чем первичная, являются повышающими. Для таких трансформаторов $k < 1$. Трансформаторы, число витков, во вторичной обмотке которых меньше чем в первичной, называют понижающими. Для таких трансформаторов $k > 1$.

Концы первичной обмотки подключаются к электрической сети (источнику переменного напряжения), а нагрузка – к концам вторичной обмотки. Переменный ток, проходящий в первичной обмотке, создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_0 и потоки рассеивания Φ_1 и Φ_2 , которые замыкаются вне магнитопровода.

Основной поток Φ_0 создает в обеих обмотках ЭДС, мгновенные значения которых \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , причем $\mathcal{E}_1 = -n_1 \Phi'(t)$, $\mathcal{E}_2 = -n_2 \Phi'(t)$, где n_1 –

число витков первичной обмотки трансформатора; n_2 – число витков вторичной обмотки. Переменный ток, проходящий в первичной обмотке, создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ , индуцирующий в обеих обмотках ЭДС, \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , причем $\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$,

$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$, где N_1 и N_2 – число витков в первичной и вторичной об-

мотках трансформатора соответственно: $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{-N_1 \frac{d\Phi}{dt}}{-N_2 \frac{d\Phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} = k$. По-

скольку, $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$, то $k = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$. Согласно закону Ома для полной цепи, действующие (амплитудные) значения ЭДС напряжения и силы тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора, связаны соотношениями: $U_1 = \mathcal{E}_1 + I_1 R_1$, $\mathcal{E}_2 = U_2 + I_2 R_2$, где R_1 и R_2 активные сопротивления первичной и вторичной обмоток соответственно.

$$\text{Следовательно, } \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{U_1 + I_1 R_1}{U_2 + I_2 R_2}.$$

Режимом холостого хода трансформатора называется режим с разомкнутой вторичной обмоткой ($I_2 = 0$).

Поскольку активное сопротивление первичной обмотки мало, а ее индуктивное сопротивление велико, то сила тока в первичной обмотке небольшая и можно считать, что $\mathcal{E}_1 = U_1$. Поэтому в режиме холостого

хода $k = \frac{U_1}{U_2}$. При увеличении переменного напряжения, приложенного

к концам первичной обмотки трансформатора, ток холостого хода, вначале возрастает пропорционально напряжению. При определенном напряжении ток холостого хода приближается к значению, когда индукция магнитного поля в магнитопроводе достигает насыщения. В режиме насыщения магнитная проницаемость стали, а значит, индуктивность первичной обмотки и ее индуктивное сопротивление резко уменьшаются. Это вызывает увеличение тока холостого хода трансформатора и, как следствие, сильное нагревание первичной обмотки и выход трансформатора из строя.

Максимальное значение тока холостого хода для конкретного трансформатора зависит от нагрева и теплоотдачи его обмоток. Для обмотки из медного провода максимальная плотность тока $j_{max} \sim 3 \frac{A}{мм^2}$.

В нагруженном (рабочем) режиме работы трансформатора вторичная обмотка выполняет для подключенной к ней нагрузки роль источника тока, ЭДС которого $\mathcal{E}_2 = U_2 + I_2 R_2$.

С учетом правила Ленца ток во вторичной обмотке имеет такое же направление, что и созданный им магнитный поток, и мешает изменению основного потока в магнитопроводе. Поэтому в момент подключения нагрузки суммарный магнитный поток уменьшается. Падает и обусловлено его изменением ЭДС самоиндукции в первичной цепи. Поскольку $U_1 - \mathcal{E}_1 = I_1 R_1$, то увеличивается сила тока в первичной цепи. Соответственно, возрастает мощность, потребляемая первичной обмоткой $P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1$ и мощность на нагрузке $P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2$.

В стационарном режиме работы трансформатора первичную и вторичную обмотки пронизывает один и тот же магнитный поток: $\Phi_1 = \Phi_2$. Если учесть, что $\Phi_1 = \Phi_0 n_1 = n_1 L L_1$, $\Phi_2 = \Phi_0 n_2 = n_2 L L_2$, получим $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$. Поэтому нагрузочные токи в обмотках трансформатора, обратно пропорциональны числу витков в этих обмотках.

Коэффициентом полезного действия трансформатора называют отношение мощности на нагрузку к мощности, потребляемой первичной обмоткой трансформатора от источника переменного тока:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1}.$$

КПД современных мощных трансформаторов очень высок, он составляет примерно 98 %. Поэтому, если нагрузка трансформатора является активной, то $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$. Кроме того, $P_1 \approx P_2$, а значит, $U_1 I_1 = U_2 I_2$, то есть увеличивая при помощи трансформатора напряжение, мы во столько же раз уменьшаем силу тока, и наоборот.

При передаче электроэнергии на большие расстояния возможны два варианта: малый ток – большое напряжение; большой ток – малое напряжение.

Поскольку потери электроэнергии в линии электропередачи (ЛЭП) обусловлены нагреванием проводов ($Q = I^2 R t$, где R – сопротивление ЛЭП), то второй вариант экономически невыгоден (уменьшение R также не выгодно, так как связано с использованием дорогих материалов – меди, серебра вместо алюминия, а также увеличением массы проводов). Поэтому приходится уменьшать силу тока, что автоматически ведет к уменьшению падения напряжения на проводах ЛЭП и снижению тепловых потерь сопротивлением проводов.

На крупных электростанциях ставят повышающие трансформаторы, первичная обмотка которых подключается к генератору, а вторич-

ная – к ЛЭП. Трансформатор повышает напряжение на линии во столько раз, во сколько уменьшает силу тока. Так как потребители, как правило, рассчитаны на низкое напряжение и большие токи, в конце ЛЭП ставится понижающий трансформатор, первичная обмотка которого включена в ЛЭП, а ко вторичной подключены потребители. Обычно понижение напряжения и, соответственно, увеличение силы тока осуществляется в несколько этапов, что дает возможность электрифицировать большие территории.

Блок-схема производства, передачи и распределения электроэнергии приведена на рис. 4.5.

Передача электроэнергии осуществляется в основном с помощью линий электропередач переменного тока. Такая линия имеет очень важное преимущество: понижающий трансформатор,

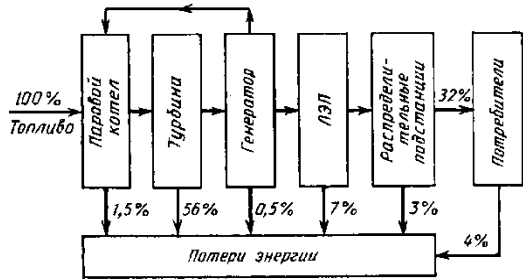


Рис. 4.5

подключенный к ней в любом месте, передает энергию потребителю. Главным недостатком линий электропередач переменного тока является наличие индуктивного сопротивления, что ведет к сдвигу фаз между током и напряжением, а значит, и к потерям мощности. Чтобы уменьшить этот сдвиг, в начале линии ставят батарею конденсаторов, емкостное сопротивление которой равно индуктивному сопротивлению линии. Благодаря этому сопротивление является чисто активным.

Широко используются также линии электропередач постоянного тока. При передаче электроэнергии с помощью таких линий переменное напряжение, которое вырабатывает генератор переменного тока, сначала повышают с помощью повышающего трансформатора, а затем выпрямляют. Выход выпрямителя подключен к линии постоянного тока.

На конце линии находится *инвертор* (аппарат, преобразующий постоянный ток в переменный). После инвертора переменный ток высокого напряжения поступает на понижающий трансформатор и от него к потребителю.

Использование постоянного тока в линиях электропередач дает возможность значительно увеличить устойчивость энергосистемы, так как отпадает необходимость в синхронизации и строгом постоянстве частоты всех генераторов электростанций, входящих в состав энергосистемы. Мощность, передаваемая потребителю, определяется действующим значением напряжения, поэтому менее жесткие и требования к изоляции

линии электропередачи. Это обусловлено тем, что в линии переменного тока изоляция должна быть рассчитана на амплитудное значение напряжения, а в линии постоянного тока – на действующее значение.

4.5. Электромагнитные волны

Электромагнитной волной называют периодический в пространстве и времени процесс распространения электромагнитного поля.

Классическая теория электромагнитных явлений, разработанная Дж. Максвеллом, является теоретическим обобщением основных законов электродинамики (закон сохранения электрического заряда, закон Кулона, закон электромагнитной индукции), которые были установлены экспериментально. Анализ этих явлений позволил Максвеллу сделать следующие выводы:

а) источниками электрического поля могут быть либо электрические заряды, либо переменные магнитные поля. При этом в первом случае линии вектора напряженности электрического поля начинаются и заканчиваются на зарядах, а во втором они оказываются замкнутыми сами на себя.

б) источниками магнитного поля являются или движущиеся электрические заряды (токи), или переменные электрические поля (названные Максвеллом токами смещения), причем в обоих случаях линии вектора индукции магнитного поля замкнуты на себя, то есть не имеют ни начала, ни конца.

Переменное электрическое поле всегда связано с переменным магнитным полем, создающим его, и наоборот, переменное магнитное поле связано с порождающим его переменным электрическим полем. Совокупность переменных вихревых электрического и магнитного полей образуют *электромагнитное поле*, представляющее собой особую форму материи, посредством которой осуществляется электромагнитное взаимодействие. Из теории Максвелла следует, что источником электромагнитного поля являются электрические заряды, движущиеся ускоренно (переменные электрические токи). Причем электромагнитное поле, созданное любым источником, распространяется в пространстве с конечной скоростью, создавая *электромагнитную волну* (табл. 4.3).

Для электромагнитных волн, как и для любых других волн, справедливо соотношение $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$, где λ – расстояние, на которое распространяется электромагнитная волна за промежуток времени, равный периоду T колебаний источника – *длина электромагнитной волны*; ν – скорость распространения электромагнитных волн, равная скорости све-

та в данной среде; ν – частота электромагнитных колебаний источника, излучающего электромагнитную волну.

Длина электромагнитной волны, излучаемой контуром, и длина волны, на которую он резонирует, определяются из соотношения $\lambda = \nu T$

Таблица 4.3

Общие свойства и характеристики электромагнитных волн

Свойства	Характеристики
1. Электромагнитные волны распространяются в пространстве с течением времени	<p>Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме постоянна $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ и не зависит от выбора инерциальной системы отсчета. Скорость электромагнитных волн в неферромагнитной среде $\nu = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ – меньше чем в вакууме</p>
2. Электромагнитные волны являются поперечными	<p>Линии напряженности электрического поля электромагнитной волны перпендикулярны к линиям индукции ее магнитного поля, поэтому векторы \vec{E} и \vec{B} в электромагнитной волне взаимно перпендикулярны. Кроме того, они перпендикулярны к направлению распространения волны, т. е. к вектору скорости $\vec{\nu}$</p>  <p style="text-align: right;"><i>Направление распространения волны</i></p>
3. Электромагнитные волны переносят энергию	<p>Плотность энергии $\omega = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$, $[\omega] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$. Средняя интенсивность излучения $\langle I \rangle = \frac{\langle EB \rangle}{\mu\mu_0}$, $[I] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$</p>
4. Электромагнитные волны оказывают давление на тела, расположенные на пути их распространения	<p>Созданное электромагнитной волной давление $p = (1 + R) \langle \omega \rangle$, где R – коэффициент отражения. $[p] = 1 \text{ Па}$</p>

Свойства	Характеристики
5. Электромагнитные волны поглощаются веществом	Диэлектрики практически прозрачны для электромагнитных волн, частота которых значительно отличается от собственных частот колебаний молекул и атомов диэлектрика. Металлы непрозрачны для электромагнитных волн за исключением самых коротких
6. На границе раздела двух сред электромагнитные волны частично отражаются, частично преломляются	Законы отражения и преломления электромагнитных волн, такие же как и законы отражение и преломление света
7. Все электромагнитные излучения проявляют свойства волн: складываются, огибают препятствия. Несколько волн одновременно могут существовать в одной области пространства	Принцип суперпозиции. Для когерентных источников правила определения максимумов. Принцип Гюйгенса–Френеля. Волны между собой не взаимодействуют
8. Сложные электромагнитные волны при взаимодействии с веществом раскладываются в спектр – дисперсия	Зависимость показателя преломления среды от частоты волны. Скорость волны в веществе зависит от показателя преломления среды

4.6. Шкала электромагнитных волн

В зависимости от способа генерации электромагнитные волны можно разделить на три группы:

1. Электромагнитные волны, которые излучаются свободными зарядами, движущимися ускоренно (переменные токи в проводниках и электронные потоки в электронных лампах). К этой группе относятся радиоволны и тормозное рентгеновское излучение. Радиоволны охватывают диапазон от 10^6 м до 1 мм. *Тормозное рентгеновское излучение* занимает диапазон длин волн 10–0,1 нм.

2. Электромагнитные волны, излучаемые внутриатомными электронами при переходах из возбужденных состояний в состояния с меньшей энергией. Эта группа включает: *инфракрасное* (1мм – 760 нм); *видимое* (760–400 нм); *ультрафиолетовое* (400–10 нм) и *характеристическое рентгеновское* (10–0,1 нм) излучения.

Инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения возникают при переходах электронов атомов (молекул), находящихся на внешних оболочках, в состояния с меньшей энергией.

Характеристическое рентгеновское излучение возникает после ионизации атома, при которой происходит выбивание электрона с од-

ной из его внутренних оболочек. Электрон одной из внешних оболочек может заполнить вакансию. При этом атом переходит в состояние с меньшей энергией (состояние с вакансией на внешней оболочке), испуская характеристическое рентгеновское излучение.

3. Электромагнитные волны, которые излучаются при внутриядерных процессах и процессах, связанных с взаимодействиями элементарных частиц, называют *гамма-излучением* (γ -излучением) ($\lambda < 0,1$ нм). Это излучение возникает при радиоактивном распаде атомных ядер, аннигиляции пар «частица–античастица», при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество и др.

Различие в свойствах (цвет видимого света, проникающая способность, биологическое действие и т. д.) электромагнитных излучений обусловлено различием их частоты, причем граница со стороны высоких частот отсутствует.

Границы между разными видами излучений являются условными и определяются способом их получения; коротковолновая часть одного вида излучения перекрывает длинноволновую часть следующего.

Представление о шкале электромагнитных волн дает диаграмма, приведенная на рис. 4.6.

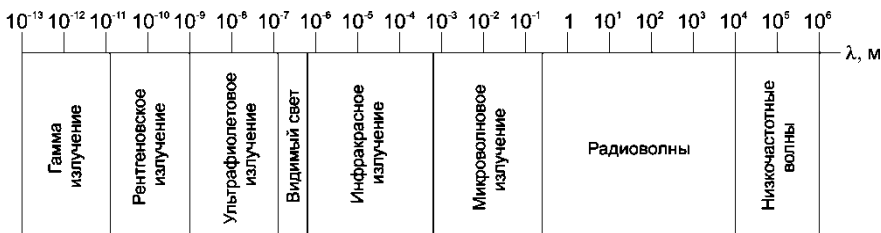


Рис. 4.6

Тренировочные упражнения для закрепления теоретического материала

1. Методические указания по решению задач

В задачах, относящихся к данной теме, рассматриваются основные закономерности и особенности собственных и вынужденных гармонических электромагнитных колебаний, которые происходят в колебательном контуре и в простейших цепях переменного тока. Эти явления специфичны, поэтому, анализируя конкретные ситуации, особое внимание необходимо обратить на физическую интерпретацию и раскрытие механизма процессов, происходящих в колебательной системе.

Приступая к решению задач по данной теме, необходимо учитывать следующее:

1. Решение задач, в которых требуется определить параметры колебательного контура или физические величины, характеризующие собственные электромагнитные колебания в идеальном или реальном колебательном контуре, основано на использовании формулы для расчета периода (частоты) собственных электромагнитных колебаний и закона сохранения и превращения энергии применительно к идеальному или реальному колебательному контуру. Поэтому в процессе анализа задач этой группы, прежде всего, необходимо выявить неизвестные параметры контура и выяснить можно ли в качестве модели рассматриваемой колебательной системы использовать «идеальный колебательный контур».

После этого нужно записать уравнения для мгновенных значений заряда и напряжения на конденсаторе и силы тока в катушке индуктивности, а при использовании энергетического метода необходимо также записать выражение для полной энергии контура в произвольный момент времени. Следует помнить, что максимальные значения напряжения и силы тока в идеальном колебательном контуре связаны соотношениями: $U_0 = \frac{q_0}{C}$, $I_0 = q_0 \omega$.

Если потерями энергии в контуре пренебречь нельзя, то для определения частоты (периода) собственных электромагнитных колебаний

необходимо воспользоваться формулой: $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{R^2}{4L^2}}$.

В некоторых задачах, относящихся к этой группе, дополнительно необходимо использовать формулы для расчета емкости плоского конденсатора, индуктивности катушки и длины электромагнитной волны, на которую резонирует контур.

2. При расчете цепей переменного тока с использованием закона Ома необходимо учитывать, что электроизмерительные приборы, включенные в цепь переменного тока, как правило, показывают действующие значения соответствующих величин, а полное сопротивление цепи состоит из активного и реактивного сопротивлений. Причем законы последовательного и параллельного соединений в цепях переменного тока отличаются от соответствующих законов в цепях постоянного тока, если для расчета используются не мгновенные, а действующие или амплитудные значения силы тока, напряжения и ЭДС. Так, при последовательном соединении сумма напряжений на отдельных участках цепи не равна ЭДС генератора переменного тока, а при параллельном соединении – сумма токов в ветвях не равна току в неразветвленной части цепи. Это обусловлено тем, что физические величины (I , U , \mathcal{E}), определяющие электромагнитные процессы во всей цепи и на ее отдельных участках, совершают гармонические колебания, фазы которых

не совпадают. Поэтому их необходимо складывать по правилу сложения векторов с учетом разности фаз (углов).

При использовании закона Ома для последовательных и параллельных RLC -цепей переменного тока следует помнить, что резонанс в последовательной и параллельной RLC цепях переменного тока, а также в идеальном и реальном колебательных контурах возникает при условии равенства емкостного и индуктивного сопротивлений, при условии, что $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. Поэтому, если известны частота генератора переменного тока ω и емкость C , то резонанс токов, как и резонанс напряжений, наступает при условии, что $L = \frac{1}{\omega^2 C}$; а при заданных ω и L если $C = \frac{1}{\omega^2 L}$.

Наконец, если заданы L и C резонанс наступает при условии, что $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. При резонансе токов коэффициент мощности равен единице, добротность равна нулю ($\cos \varphi = 1$, $Q = 0$) и обмена энергией между генератором и потребителем энергии нет.

Решение задач на расчет мощности и экономической эффективности трансформаторов и цепей переменного тока осуществляется на основе формул для расчета коэффициента трансформации, активной, реактивной и полной мощностей в цепи переменного тока, а также формул для расчета коэффициента полезного действия. Активная мощность в цепи переменного тока $P = I_d^2 R = I_d U_d \cos \varphi$ характеризует среднюю скорость необратимого преобразования электрической энергии в другие виды энергии (внутреннюю, механическую, химическую и т. д.). Коэффициент мощности $\cos \varphi$ показывает, какую часть от полной мощности составляет активная мощность. При низком коэффициенте мощности нагрузка потребляет лишь малую часть энергии вырабатываемой генератором переменного тока. Оставшаяся часть энергии периодически перекачивается от генератора к потребителю и обратно и рассеивается в линии электропередач.

2. Примеры решения задач

Задача 1. Сила тока в катушке индуктивности колебательного контура, емкость конденсатора которого равна 2 мкФ, с течением времени изменяется по закону $I = 0,01 \cos 1000t$ (А). Определите период электромагнитных колебаний в контуре, индуктивность катушки и максимальное значение напряжения на конденсаторе.

Дано:

$$C = 2 \text{ мкФ}$$

$$I = 0,01 \cos 1000t$$

$$T - ?, L - ?, U_0 - ?$$

Решение. Систему отсчета свяжем с лабораторией, и будем считать ее инерциальной. В качестве физической системы рассмотрим закрытый колебательный контур, который покоится относительно лаборатории, и будем считать его идеальным. Зависимость силы тока в идеальном контуре от времени в общем случае имеет вид: $I = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$, где I_0 – максимальное значение силы тока, ω – его циклическая частота.

Из сравнения этого выражения с выражением приведенным в условии задачи следует, что $I_0 = 0,01 \text{ А}$, $\omega = 1000 \text{ с}^{-1}$, $\varphi_0 = 0$.

Период собственных электромагнитных колебаний в идеальном контуре $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC}$. Следовательно, его индуктивность $L = \frac{1}{\omega^2 C}$.

Для нахождения максимального значения напряжения на конденсаторе воспользуемся законом сохранения полной энергии, согласно которому сумма механической $E_{\text{мех}}$, внутренней U и электромагнитной $W_{\text{эм}}$ энергий системы в процессе колебаний не изменяется. Следовательно, изменение полной энергии системы равно нулю: $\Delta W = \Delta E_{\text{мех}} + \Delta U + \Delta W_{\text{эм}} = 0$.

Механическая энергия контура в процессе колебаний не изменяется, поскольку конденсатор и катушка покоятся относительно инерциальной системы отсчета, связанной с лабораторией $\Delta E_{\text{мех}} = 0$, при сделанных нами допущениях $-\Delta E_{\text{мех}} = 0$ и $\Delta U = 0$. Таким образом, $W_{\text{эм}} = 0$, или $\Delta W_L + \Delta W_C = 0$.

В качестве начального состояния системы выберем состояние в момент времени, когда сила тока в катушке индуктивности максимальна, а в качестве конечного – состояние в момент времени, когда сила тока равна нулю.

Тогда полная электромагнитная энергия контура в начальный момент времени $W_{\text{нач}} = W_L = \frac{LI^2}{2}$, так как заряд конденсатора в этот момент времени равен нулю.

Поэтому полная электромагнитная энергия контура в конечном состоянии $W_{\text{кон}} = W_C = \frac{CU^2}{2}$. Следовательно, $\Delta W = \frac{LI_0^2}{2} - \frac{CU_0^2}{2} = 0$. Откуда,

$U_0 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$. Подставив в последнюю формулу полученное выше значение индуктивности катушки, получим окончательно $U_0 = \frac{I_0}{\omega C}$.

Этот же результат можно получить, если учесть, что сила тока является первой производной от заряда на обкладках конденсатора по времени: $I = q'(t)$. При заданной в условии задачи зависимости силы тока от времени $q = \int_0^t I_0 \cos(\omega t + \varphi_0) dt = \frac{I_0}{\omega} \sin(\omega t + \varphi_0)$. Следовательно, максимальное значение заряда $q_0 = \frac{I_0}{\omega}$. С другой стороны, $q_0 = CU_0$, таким образом, $U_0 = \frac{I_0}{\omega C}$.

Если в формулы для расчета T , L и U_0 подставить числовые значения физических величин, приведенные в задаче, получим: $T = 6,28$ мс, $L = 0,05$ Гн, $U_0 = 0,5$ В.

Ответ: $T = 6,28$ мс, $L = 0,05$ Гн, $U_0 = 0,5$ В.

Задача 2. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 1,0$ мкФ и катушки индуктивностью $L = 40$ мГн. Определите максимальное значение силы тока I_0 в контуре, если в начальный момент времени напряжение на конденсаторе $U_0 = 10$ В, а тока в контуре нет.

Дано:

$$C = 1,0 \text{ мкФ}$$

$$L = 40 \text{ мГн}$$

$$U_0 = 10 \text{ В}$$

$$I_0 = ?$$

Решение. В качестве физической системы рассмотрим замкнутую электрическую цепь, состоящую из конденсатора и катушки индуктивности, соединенных последовательно. В качестве модели системы можно выбрать идеальный колебательный контур. Поскольку в процессе колебаний механическая энергия контура и его внутренняя энергия не изменяются, то закон сохранения энергии для рассматриваемой системы можно записать в виде $W_L + W_C = \text{const}$ или $\Delta W_L + \Delta W_C = 0$, где ΔW_C и ΔW_L – изменения энергии электростатического поля конденсатора и магнитного поля катушки при переходе системы из начального состояния в конечное.

Если в качестве начального выбрать состояние системы в момент времени, когда сила тока в катушке равна нулю, а в качестве конечного – состояние в момент времени, когда сила тока в катушке максима-

льна, то $\Delta W_L = \frac{LI_0^2}{2} - 0$. Поскольку энергия электростатического поля

конденсатора в начальном состоянии $W_{\text{нач}} = W_C = \frac{CU_0^2}{2}$, а в конечном

состоянии равна нулю, то $\Delta W_C = 0 - \frac{CU_0^2}{2}$. Следовательно, $\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}$,

то есть $I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}$.

Подставив числовые значения величин, выраженные в единицах СИ, получим $I_0 = 0,05 \text{ A}$.

Ответ: $I_0 = 0,05 \text{ A}$.

Задача 3. Колебательный контур, в котором поддерживаются незатухающие электромагнитные колебания, потребляет от внешнего источника мощность $P = 0,2 \text{ мВт}$. Определите амплитудное значение силы тока I_0 и частоту собственных электромагнитных колебаний в контуре, если его активное сопротивление $R = 20 \text{ Ом}$, индуктивность катушки $L = 24 \text{ мГн}$, а емкость конденсатора $C = 48 \text{ мкФ}$.

Дано:

$$P = 0,2 \text{ мВт}$$

$$R = 20 \text{ Ом}$$

$$C = 48 \text{ мкФ}$$

$$L = 24 \text{ мГн}$$

$$I_0 = ?, \nu = ?$$

Решение. В качестве физической системы рассмотрим колебательный контур, который будем считать закрытым. Выделенная физическая система является незамкнутой, поскольку имеет место обмен энергией между нею и внешним источником. Поэтому ее можно описать теоремой об изменении полной энергии, согласно которой $\Delta W = A$. Катушка и конденсатор неподвижны относительно системы отсчета, связанной с лабораторией, поэтому механическая энергия контура не изменяется.

Электромагнитная энергия системы также не должна изменяться, поскольку в контуре поддерживаются незатухающие колебания.

Если предположить, что имеют место только потери, обусловленные нагреванием током проводника катушки и проводников, соединяющих ее с обкладками конденсатора, то изменение полной энергии системы равно изменению только ее внутренней энергии: $\Delta W = \Delta U$. Поскольку $\Delta U = Q$, где Q – количество теплоты, выделяемое электрическим током в контуре за промежуток времени Δt . Следовательно, $\Delta W = Q$.

Сила тока в контуре изменяется с течением времени по закону $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$, где I – мгновенное значение силы тока в контуре, I_0 – его амплитудное значение, ω – циклическая частота электромагнитных колебаний в контуре, φ_0 – сдвиг фаз между колебаниями силы тока в катушке и напряжения на обкладках конденсатора.

Согласно закону Джоуля–Ленца, количество теплоты

$$Q = \langle I^2 \rangle R \Delta t = \langle I_0^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0) \rangle R \Delta t.$$

Если учесть, что $\langle \sin^2(\omega t + \varphi_0) \rangle = \frac{1}{2}$,

а $\langle I_0 \rangle^2 = I_0^2$, получим $Q = \frac{1}{2} I_0^2 R \Delta t$. Откуда, $I_0 = \sqrt{\frac{2W}{R \Delta t}}$.

Электромагнитные колебания будут незатухающими, если потери энергии в контуре за промежуток времени Δt будут скомпенсированы энергией, поступающей в контур от внешнего источника, то есть при

условии, что $\Delta W = P \Delta t$, где P – мощность, потребляемая контуром от внешнего источника. Следовательно, $I_0 = \sqrt{\frac{2P}{R}}$. Частота собственных электромагнитных колебаний в контуре: $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{R^2}{4L^2}}$.

Подставив числовые значения физических величин, получим:

$$I_0 = 4,47 \text{ мА}, \nu = 132 \text{ Гц}.$$

Ответ: $I_0 = 4,47 \text{ мА}, \nu = 132 \text{ Гц}.$

Задача 5. Сколько времени будет гореть неоновая лампочка с симметричными электродами на протяжении одной минуты, если ее включить в сеть переменного тока частотой $\nu = 50 \text{ Гц}$ с действующим значением напряжения $U_{\text{д}} = 120 \text{ В}$, если напряжение, при котором лампочка загорается, равно 84 В .

Дано:

$$\Delta t = 60 \text{ с}, \nu = 50 \text{ Гц}$$

$$U_{\text{д}} = 120 \text{ В}$$

$$U_3 = 84 \text{ В}$$

$\Delta t = ?$

Решение. Напряжение между электродами лампочки изменяется с течением времени по закону: $U = U_0 \sin \omega t$, где $U_0 = U_{\text{д}} \sqrt{2}$, $\omega = 2\pi \nu$. С учетом этого формулу для мгновенного значения напряжения можно записать в виде $U = U_{\text{д}} \sqrt{2} \sin 2\pi \nu t$.

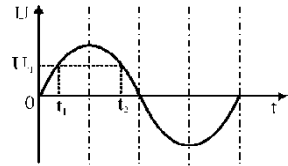


Рис. 4.7

Лампочка загорается при напряжении, равном напряжению зажигания U_3 и гаснет при $U < U_3$. Поэтому на протяжении одного полупериода переменного тока время ее горения $\Delta t_0 = t_2 - t_1$, где t_1 и t_2 – промежутки времени от начала периода до момента зажигания и гашения лампочки соответственно. Если учесть, что в интервале времени $t_0 = 60 \text{ с}$, содержится $2\Delta t_0 \nu$ таких промежутков, то время горения лампочки на протяжении одной минуты равно $\Delta t = 2\Delta t_0 \nu t_0$.

Значения t_1 и t_2 найдем из формулы для мгновенных значений напряжения между электродами лампочки с учетом того, что в эти моменты времени $U = U_3$ (рис. 4.7). Поэтому $U_3 = \sqrt{2} U_{\text{д}} \sin 2\pi \nu t_1$, $U_3 = \sqrt{2} U_{\text{д}} \sin 2\pi \nu t_2$.

$$\text{Откуда, } t_1 = \frac{1}{2\pi \nu} \arcsin \left(\frac{U_3}{\sqrt{2} U_{\text{д}}} \right); t_2 = \frac{1}{2\pi \nu} \left(\pi - \arcsin \left(\frac{U_3}{\sqrt{2} U_{\text{д}}} \right) \right).$$

$$\text{Тогда } \Delta t_0 = t_2 - t_1 = \frac{1}{2\pi \nu} \left(\pi - 2 \arcsin \left(\frac{U_3}{\sqrt{2} U_{\text{д}}} \right) \right).$$

С учетом этого время горения лампочки составляет:

$$\Delta t = 2\nu t_0 \frac{1}{2\pi \nu} \left(\pi - \arcsin \left(\frac{U_3}{\sqrt{2} U_{\text{д}}} \right) \right) \text{ или } \Delta t = \frac{t_0}{\pi} \left(\pi - 2 \arcsin \left(\frac{U_3}{\sqrt{2} U_{\text{д}}} \right) \right).$$

Подставив числовые значения физических величин, получим:
 $\Delta t = 40 \text{ с.}$

Ответ: $\Delta t = 40 \text{ с.}$

Задача 6. Магнитный поток, пронизывающий рамку, изготовленную из медного проводника, которая равномерно вращается в однородном магнитном поле, изменяется с течением времени по закону $\Phi = 200 \cos 200\pi t$ (мВб). Концы рамки замкнуты на резистор сопротивлением $R=10 \text{ Ом}$. Определите амплитудные и действующие значения напряжения и силы тока в резисторе, период переменного тока в рамке и мощность, потребляемую резистором.

Дано:

$$\Phi = 200 \cos 200\pi t$$

$$R=10 \text{ Ом}$$

$$U_0 - ?, U_{\text{д}} - ?, I_0 - ?, \\ I_{\text{д}} - ?, T - ?, P - ?$$

Решение. Предположим, что ось вращения рамки неподвижна относительно инерциальной системы отсчета «лаборатория». В качестве физических систем будем поочередно рассматривать «рамку в магнитном поле» и «резистор». Моделью первой системы является генератор синусоидального переменного тока, а моделью второй – участок цепи переменного тока, реактивное сопротивление которого равно нулю.

Магнитный поток, пронизывающий каждый виток рамки, изменяется по гармоническому закону, поэтому в общем случае его зависимость от времени имеет вид: $\Phi = \Phi_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$. Из сравнения общего выражения для магнитного потока с выражением, приведенным в задаче, следует, что максимальное значение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром рамки $\Phi_0 = 0,2 \text{ Вб}$; угловая скорость вращения рамки в магнитном поле $\omega = 200\pi \text{ с}^{-1}$, $\varphi_0 = 0$.

Согласно закону электромагнитной индукции, мгновенное значение ЭДС, возникающей в рамке, равно первой производной от магнитного

потока по времени, взятой с отрицательным знаком: $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$. Следовательно, $\mathcal{E} = -(\Phi_0 \cos(\omega t + \varphi_0))' = \Phi_0 \omega \sin(\omega t + \varphi_0)$.

Таким образом, амплитудное значение ЭДС $\mathcal{E} = \Phi_0 \omega$, а ее действующее значение $\mathcal{E}_{\text{д}} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}} = \frac{\Phi_0 \omega}{\sqrt{2}}$.

Предположим, что полное сопротивление рамки мало по сравнению с сопротивлением резистора. Тогда мгновенные значения напряжения на резисторе и ЭДС индукции, возникающей в рамке, будут одинаковыми: $U = \mathcal{E} = \Phi_0 \omega \sin \omega t$. Следовательно, $U_0 = \Phi_0 \omega$, $U_{\text{д}} = \frac{\Phi_0 \omega}{\sqrt{2}}$.

Поскольку сопротивление резистора является чисто активным, то мгновенное, амплитудное и действующее значения силы тока в цепи

равны $I = \frac{U}{R} = \frac{\Phi_0 \omega}{R} \sin \omega t$, $I_0 = \frac{U_0}{R} = \frac{\Phi_0 \omega}{R}$, $I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{\Phi_0 \omega}{R\sqrt{2}}$ соответственно. При этом колебания напряжения и силы тока в цепи совпадают по фазе.

Циклическая частота переменного тока в цепи равна угловой скорости вращения рамки в магнитном поле, поэтому период переменного тока $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Полная мощность, потребляемая цепью, является активной мощностью, рассеиваемой на резисторе: $S = P_A = I_d^2 R = \frac{\Phi_0^2 \omega^2}{2R}$.

Подставив в формулы числовые значения физических величин, получим $U_0 = 125,6 \text{ В}$, $U_d \cong 90 \text{ В}$, $I_0 = 12,56 \text{ А}$, $I_d \cong 9 \text{ А}$, $T = 10 \text{ мс}$, $P = 810 \text{ Вт}$.

Ответ: $U_0 = 125,6 \text{ В}$, $U_d \cong 90 \text{ В}$, $I_0 = 12,56 \text{ А}$, $I_d \cong 9 \text{ А}$, $T = 10 \text{ мс}$, $P = 810 \text{ Вт}$.

Задача 7. Два конденсатора, емкости которых равны $C_1 = 0,4 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 0,2 \text{ мкФ}$, соединены последовательно и включены в цепь переменного тока с действующим значением напряжения $U_d = 220 \text{ В}$ и частотой $\nu = 50 \text{ Гц}$. Определите действующие значения силы тока I_d в цепи и действующие значения напряжений U_{d1} и U_{d2} на каждом конденсаторе.

Дано:

$$C_1 = 0,4 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 0,2 \text{ мкФ}$$

$$U_d = 220 \text{ В}$$

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$I_d = ?$$

$$U_{d1} = ?$$

$$U_{d2} = ?$$

Решение. Емкостное сопротивление цепи, рассматриваемой в задаче, $X_C = \frac{1}{\omega C}$, где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота переменного тока. Общая емкость конденсаторов, соединенных последовательно,

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \text{ С учетом этого } X_C = \frac{C_1 + C_2}{2\pi\nu C_1 C_2}.$$

Если предположить, что сопротивление утечки

конденсаторов и активное сопротивление соединительных проводников мало по сравнению с емкостным сопротивлением, то согласно закону Ома для участка цепи переменного тока с чисто емкостным сопротивлением, получим $I_d = \frac{U_d}{X_C} = \frac{2\pi\nu C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_d$.

Сдвиг фаз между колебаниями напряжения на первом и на втором конденсаторах равен нулю. Поэтому $U_d = U_{d1} + U_{d2}$, где U_{d1} и U_{d2} – действующие значения напряжений на первом и втором конденсаторах.

$$U_{d1} = I_d X_{C1} = I_d \frac{1}{2\pi\nu C_1} = \frac{U_d C_1}{C_1 + C_2}, \quad U_{d2} = I_d X_{C2} = I_d \frac{1}{2\pi\nu C_2} = \frac{U_d C_2}{C_1 + C_2}.$$

Выполнив числовые расчеты, получим: $I_d = 9 \text{ мА}$; $U_{d1} = 73,3 \text{ В}$; $U_{d2} = 146,7 \text{ В}$.

Задача 8. В цепь переменного тока с действующим значением напряжения $U_d = 120$ В включили катушку, индуктивность которой равна $L = 60$ мГн. Определите частоту переменного тока, если амплитудное значение силы тока в цепи $I_0 = 1,4$ А, а сдвиг фаз между колебаниями силы тока и колебаниями напряжения в катушке составляет $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Дано:

$$U_d = 120 \text{ В}$$

$$L = 60 \text{ мГн}$$

$$I_0 = 1,4 \text{ А}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

$\nu = ?$

Решение. Согласно условию задачи, сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения в катушке равен $\frac{\pi}{2}$. Это означает, что катушка обладает только индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$. В соответствии с законом Ома для цепи переменного тока, действующее значение силы тока в катушке $I_d = \frac{U_d}{X_L}$. Если учесть, что $I_d = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$, а $\omega = 2\pi\nu$, то получим $\frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{U_d}{2\pi\nu L}$. Откуда частота переменного тока $\nu = \frac{\sqrt{2}U_d}{2I_0\pi L}$.

Ответ: $\nu = 320$ Гц.

Задача 9. В сеть переменного тока с частотой $\nu = 50$ Гц и амплитудным значением напряжения $U_0 = 120$ В включена катушка индуктивностью $L = 45$ мГн, активное сопротивление которой равно $R = 12$ Ом. Какой емкости конденсатор необходимо включить последовательно с катушкой для того, чтобы активная мощность, потребляемая цепью, была максимальной? Определите эту мощность.

Дано:

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$U_0 = 120 \text{ В}$$

$$L = 45 \text{ мГн}$$

$$I_0 = 1,4 \text{ А}$$

$$R = 12 \text{ Ом}$$

$C_x = ?$

$P_{\max} = ?$

Решение. Активная мощность, потребляемая последовательным RLC участком цепи переменного тока, равна количеству теплоты, которое выделяется на активном сопротивлении этого участка в единицу времени $P = I_d^2 R$, где I_d – действующее значение силы тока в цепи. Для определения I_d воспользуемся законом Ома для последовательного RLC – участка цепи переменного тока, согласно которому $I_d = \frac{U_d}{Z} = \frac{U_0}{\sqrt{2}Z}$, где U_d – действующее значение напряжения, а U_0 его амплитудное, значение, Z – полное сопротивление участка цепи. В нашем случае

$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$, где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота переменного тока.

$$\text{С учетом этого, } P = \frac{U_0^2 R}{2(R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2)}.$$

Из последней формулы следует, что активная мощность, потребляемая участком цепи, будет максимальной, если его полное сопротивление минимально. Это соответствует случаю, когда реактивное сопротивление участка цепи равно нулю: $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$, то есть резонансу напряжений на данном участке. Таким образом, емкость конденсатора, который необходимо включить в цепь, $C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \nu^2 L}$.

Максимальное значение активной мощности, которую потребляет участок цепи, $P = \frac{U_{\Delta}^2}{2R}$.

Ответ: $C = 22,5 \text{ мФ}; P = 600 \text{ Вт}$.

Задача 10. Напряжение между концами вторичной обмотки трансформатора, номинальная мощность которого равна $P_0 = 1 \text{ МВт}$, составляет $U_1 = 6 \text{ кВ}$. К концам обмотки подключена линия электропередачи переменного тока. При этом разность показаний электросчетчиков, установленных на трансформаторных подстанциях в начале линии и в ее конце, каждые сутки увеличивается на $\Delta W = 216 \text{ кВт}\cdot\text{час}$. Можно ли использовать этот трансформатор для передачи электроэнергии, если потери в линии электропередачи не должны превышать $\gamma = 0,1 \%$ от передаваемой мощности?

Дано:

$$P_0 = 1 \text{ МВт}; U_1 = 6 \text{ кВ}$$

$$\Delta W = 216 \text{ кВт}\cdot\text{час}$$

$$\gamma_1 = 0,1 \%$$

$$U_2 - ? \quad \gamma_2 - ?$$

Решение. По условию задачи потери в линии электропередачи не должны превышать $0,1 \%$ от передаваемой мощности. Потери энергии в линии электропередач за сутки ΔW . Поэтому потери мощности $P = \frac{\Delta W}{t}$. С учетом этого, доля потерь составляет $\gamma_1 = \frac{P}{P_0} = \frac{\Delta W}{P_0 t}$, где P_0 – номинальная мощность трансформатора. Подставив числовые значения, получим: $\gamma_1 = 9 \cdot 10^{-3}$.

Таким образом, $\gamma_1 = 0,9 \%$, что в 9 раз превышает максимально допустимые потери ($\gamma_1 = 0,1 \%$). Поэтому использовать данный трансформатор для передачи электроэнергии в соответствии с требованиями задачи нельзя.

Определим, каким должно быть напряжение между концами вторичной обмотки трансформатора с такой же номинальной мощностью для того, чтобы по условию задачи потери не превышали максимально допустимых. Поскольку $P_0 = IU \cos \varphi$, то $P = \gamma P_0 = \gamma IU \cos \varphi$. Поэтому в первом и втором случаях потери мощности $P_1 = \gamma_1 I_1 U_1 \cos \varphi$, $P_2 = \gamma_2 I_2 U_2 \cos \varphi$, соответственно.

С другой стороны, эти потери в основном являются тепловыми. Поэтому $P_1 = I_1^2 R$, $P_2 = I_2^2 R$, где R – сопротивление линии электропередачи.

С учетом этого получим $I_1^2 R = \gamma_1 I_1 U_1 \cos \varphi$, $I_2^2 R = \gamma_2 I_2 U_2 \cos \varphi$. Откуда, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{\gamma_1 U_1}{\gamma_2 U_2}$. Если учесть, что потери мощности в первом и втором случаях должны быть одинаковыми: $\gamma_1 I_1 U_1 \cos \varphi = \gamma_2 I_2 U_2 \cos \varphi$, получим, что $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$. Следовательно, $\frac{U_2}{U_1} = \frac{\gamma_1 U_1}{\gamma_2 U_2}$, откуда $U_2 = U_1 \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_2}}$.

Если в последнюю формулу подставить значение γ_1 , получим окончательно: $U_2 = U_1 \sqrt{\frac{\Delta W}{\gamma_2 P_0 t}}$.

Ответ: $U_2 = 18$ кВ.

3. Задания для самостоятельной работы

3.1. Вопросы к теме «Электромагнитные колебания и волны»

1. Выделите существенные признаки понятия «колебательный контур».

2. Какие колебания называют а) свободными, б) вынужденными?

3. Почему электромагнитные колебания в колебательном контуре не прекращаются в тот момент, когда конденсатор разряжается полностью?

4. Выведите формулу для расчета периода электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре.

5. Постройте графики зависимости заряда на обкладках конденсатора, силы тока и ЭДС самоиндукции в катушке индуктивности колебательного контура от времени.

6. Постройте графики зависимости периода свободных колебаний в контуре от емкости конденсатора и индуктивности катушки.

7. По какому закону изменяется амплитуда затухающих колебаний? Являются ли затухающие колебания периодическими?

8. Почему частота затухающих колебаний меньше частоты собственных колебаний системы?

9. Объясните механизм возникновения вынужденных электрических колебаний в цепи переменного тока.

10. Какова природа сторонних сил, вызывающих ЭДС индукции в генераторах переменного тока?

11. Какое значение силы переменного тока называют действующим?

12. Какова связь между действующим и амплитудным значениями переменного синусоидального тока

13. Почему в цепях переменного тока мгновенные значения силы тока и напряжения не совпадают по фазе?
14. Назовите основные физические характеристики участка цепи переменного тока.
15. Почему конденсатор и катушка индуктивности оказывают сопротивление переменному току?
16. Запишите формулы для расчета емкостного и индуктивного сопротивлений и укажите причины их существования.
17. Как изменяется сдвиг фаз между силой тока и напряжением в цепи переменного тока, при изменении частоты тока?
18. Постройте графики зависимости активного, емкостного и индуктивного сопротивлений от частоты переменного тока.
19. Запишите формулу для расчета коэффициента трансформации в режиме холостого хода и в рабочем режиме работы трансформатора.
20. Выделите существенные признаки понятий «электромагнитное поле» и докажите, что электромагнитное поле является вихревым.
21. Выделите существенные признаки понятия «электромагнитная волна». Объясните механизм возникновения и распространения электромагнитных волн.
22. Может ли электромагнитная волна распространяться в вакууме? Что называют фронтом волны и волновой поверхностью?
23. Запишите уравнение плоской электромагнитной волны и поясните физический смысл величин, входящих в это уравнение.
24. Запишите формулы для расчета энергии и плотности энергии электромагнитной волны.
25. Что представляет собой шкала электромагнитных волн?
26. Что имеет большую длину волны – сигналы радио- и телевизионных станций или видимый свет?
27. Почему сигналы опасности подаются красным светом, в то время как глаз наиболее чувствителен к желто-зеленому свету?

3.2. Задачи для самопроверки

1. Частота электромагнитных колебаний в контуре $\nu_1 = 10$ кГц. Во сколько раз нужно изменить расстояние между обкладками плоского конденсатора этого контура, чтобы частота составила $\nu_2 = 20$ кГц?
2. При увеличении емкости конденсатора колебательного контура на $\Delta C = 80$ нФ частота колебаний уменьшилась в три раза. Определите первоначальное значение емкости C конденсатора, если индуктивность катушки не изменяется.
3. Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и двух одинаковых конденсаторов, соединенных параллельно. Как изме-

нится частота колебаний в контуре, если конденсаторы соединить последовательно?

4. Заряженный конденсатор емкостью C подключен через ключ к двум катушкам с индуктивностями L_1 и L_2 , соединенным параллельно. В начальный момент времени ключ разомкнут. Если ключ замкнуть, то максимальное значение силы тока в первой катушке равно I_1 . Определите первоначальный заряд q_0 конденсатора.

5. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 0,2$ Гн и конденсатора емкостью $C = 10$ мкФ, заряженного до напряжения $U_{0C} = 2$ В. Определите силу тока I в момент времени, когда энергия контура окажется поровну распределенной между электростатическим полем конденсатора и магнитным полем катушки.

6. Как изменится частота, амплитуда и энергия электромагнитных колебаний в контуре емкостью C и индуктивностью L , если в момент времени, когда заряд на обкладках конденсатора максимален, расстояние между ними мгновенно уменьшить в два раза или в момент времени, когда сила тока в цепи максимальна, мгновенно увеличить длину катушки индуктивности в два раза?

7. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 28$ мкГн с активным сопротивлением $R = 1$ Ом и конденсатора емкостью $C = 2,2$ нФ. Определите мощность P потребляемую контуром, если в нем поддерживаются незатухающие электромагнитные колебания, при которых максимальное напряжение на конденсаторе $U_{0C} = 5$ В.

8. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и плоского конденсатора, настроен на длину волны $\lambda_1 = 1000$ м. Когда расстояние между обкладками конденсатора уменьшили в четыре раза, его емкость увеличилась на $\Delta C = 18$ пФ. Определите индуктивность L катушки и длину волны λ_2 , на которую будет резонировать новый контур.

9. На какую длину волны λ резонирует колебательный контур, если максимальный заряд конденсатора $q_0 = 10$ мкКл, а максимальная сила тока в контуре $I_0 = 10$ А?

10. Две катушки, индуктивности которых L_1 и L_2 , соединены параллельно и подключены к конденсатору емкостью C , заряженному до напряжения U_0 . Определите максимальные значения силы тока I_1 и I_2 в катушках и длину волны λ , на которую резонирует такой колебательный контур.

11. Определите длину электромагнитной волны λ_0 в вакууме, если частота колебаний в ней $\nu = 450$ ТГц. Чему равна скорость v распространения и длина этой волны λ в бензоле?

12. Лампочку, рассчитанную на напряжение $U_1 = 3,5$ В и силу тока $I_1 = 0,28$ А, соединили последовательно с конденсатором и включили в сеть переменного тока стандартной частоты с действующим значени-

ем напряжения $U = 220$ В. Определите емкость C конденсатора, если лампочка горит нормальным накалом.

13. Катушка, индуктивность которой $L = 45$ мГн, активное сопротивление $R = 10$ Ом, включена в цепь переменного тока стандартной частоты с действующим значением напряжения $U = 220$ В. Определите силу тока I в катушке и сдвиг фаз φ между колебаниями силы тока и напряжения.

14. Определите сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения для цепи переменного тока частотой $\nu = 50$ Гц и амплитудным значением напряжения $U = 100$ В, в которую включены последовательно соединенные конденсатор емкостью $C = 1$ мкФ, катушка индуктивностью $L = 0,5$ Гн и активное сопротивление $R = 1$ кОм. Определите мощность P , потребляемую цепью.

15. По участку цепи (рис. 4.8) проходит синусоидальный переменный ток. Индуктивность катушки – $L = 0,25$ Гн, емкость конденсатора $C = 100$ мкФ. Активным сопротивлением участка можно пренебречь. При каком значении частоты сопротивление этого участка равно нулю?

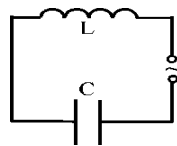


Рис. 4.8

16. В цепи, изображенной на рис. 4.9, проходит синусоидальный переменный ток частотой $\nu = 50$ Гц, причем действующие значения напряжений $U_{AB} = 15$ В, $U_{BD} = 12$ В, $U_{DK} = 10$ В. Определите действующее значение напряжения на участке АД и сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения на этом участке. Постройте векторную диаграмму цепи.

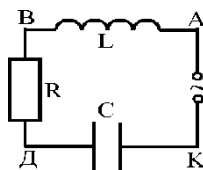


Рис. 4.9

17. В сеть переменного тока стандартной частоты с действующим значением напряжения $U = 220$ В включены параллельно соединенные конденсатор емкостью C и резистор сопротивлением R . Определите действующее значение силы тока в цепи и сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

18. В цепь переменного тока стандартной частоты с амплитудным значением напряжения $U = 100$ В включены последовательно соединенные катушка индуктивностью $L = 0,2$ Гн, активное сопротивление которой $R = 10$ Ом и конденсатор емкостью $C = 500$ мкФ. На какое напряжение рассчитана изоляция провода катушки?

19. Действующее значение напряжения на конденсаторе емкостью $C = 1$ мкФ, включенного в цепь переменного тока, равно $U = 100$ В. Определите максимальное значение энергии электрического поля конденсатора.

20. Зависимость напряжения сети переменного тока от времени описывается уравнением $U = 310 \cos \omega t$ (В). Определите тепловую

мощность электроплитки, активное сопротивление которой $R = 30$ Ом, включенной в эту сеть.

21. К катушке, активное сопротивление которой $R = 3$ Ом подведено напряжение $U = 50 \sin 100\pi t$ (В). Определите коэффициент мощности ($\cos \varphi$), активную мощность и индуктивность катушки, если амплитудное значение силы тока в цепи $I_0 = 10$ А. Составьте уравнение зависимости силы тока в катушке от времени.

22. В сеть переменного тока с действующим значением напряжения $U = 127$ В последовательно включены резистор сопротивлением $R = 15$ Ом и катушка индуктивностью $L = 50$ мГн. Определите частоту тока, мощность P , потребляемую катушкой и коэффициент мощности ($\cos \varphi$), если амплитудное значение силы тока в цепи $I_0 = 7$ А.

23. После того как в сеть переменного тока стандартной частоты последовательно с электроплиткой, рабочее сопротивление которой $R_1 = 60$ Ом, включили катушку индуктивности, активное сопротивление которой $R_2 = 2$ Ом, потребляемая плиткой мощность уменьшилась в три раза. Определите индуктивность L катушки.

24. Двигатель мощностью $P = 10$ кВт работает при напряжении $U = 240$ В и частоте $\nu = 50$ Гц с коэффициентом мощности $\cos \varphi_1 = 0,6$. Определите емкость C конденсатора, который нужно включить параллельно с обмоткой двигателя, чтобы повысить коэффициент мощности до значения $\cos \varphi_2 = 0,9$.

25. Проволочное кольцо, состоящее из двух разнородных проводников одинаковой длины l и площади поперечного сечения S , равномерно вращается с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле, модуль индукции которого B_0 . Ось вращения кольца проходит по его диаметру и составляет прямой угол с вектором \vec{B}_0 . Определите тепловую мощность, которая выделяется в кольце, если удельные сопротивления проводников ρ_1 и ρ_2 , соответственно.

26. Сопротивление нагрузки однополупериодного выпрямителя, включенного в сеть переменного тока стандартной частоты с действующим значением напряжения $U_1 = 220$ В, составляет $R = 100$ Ом. Как изменится мощность, потребляемая нагрузкой, если параллельно ней подключить конденсатор достаточно большой емкости?

27. Определите мощность P переменного тока на резисторах R_2 и R_3 (рис. 4.10), если $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 15$ Ом, а действующее напряжение сети переменного тока стандартной частоты равно $U = 110$ В.

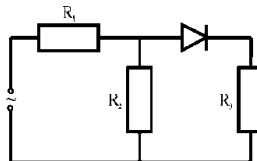


Рис. 4.10

Схема электрической цепи, состоящей из двух идеальных диодов и трех одинаковых резисторов сопротивлением $R = 5 \text{ кОм}$ каждый, приведена на рис. 4.11. Определите активную мощность, потребляемую цепью, если она включена в сеть переменного тока с действующим значением напряжения $U_1 = 220 \text{ В}$.

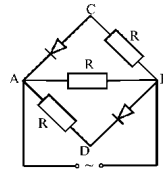


Рис.4.11

28. Действующее значение напряжения на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_1 = 220 \text{ В}$, а действующее значение силы тока во вторичной обмотке $I_2 = 11 \text{ А}$. Определите КПД η трансформатора, если сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 0,5 \text{ Ом}$, коэффициент трансформации $k = 10$.

29. Трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 10$ понижает напряжение с $U_1 = 10 \text{ кВ}$ до $U_2 = 800 \text{ В}$. Определите КПД η трансформатора и сопротивление R_2 его вторичной обмотки, если действующее значение силы тока в ней $I_2 = 2 \text{ А}$.

30. Первичная обмотка понижающего трансформатора включена в сеть переменного тока стандартной частоты с действующим значением напряжения $U_1 = 220 \text{ В}$. Действующее значение напряжения на зажимах вторичной обмотки сопротивлением $R_2 = 1 \text{ Ом}$, составляет $U_2 = 20 \text{ В}$. Определите, коэффициент трансформации k и КПД η трансформатора, если действующее значение силы тока в нагрузке $I_2 = 2 \text{ А}$.

31. Сила тока в первичной обмотке трансформатора включенного в сеть переменного тока стандартной частоты с действующим значением напряжения $U_1 = 127 \text{ В}$, составляет $I_1 = 0,5 \text{ А}$. Вторичная обмотка питает лампу накаливания, рассчитанную на напряжение $U_2 = 12 \text{ В}$ и силу тока $I_2 = 3 \text{ А}$. Определите активное сопротивление, индуктивность и сдвиг фаз между током и напряжением в первичной обмотке, если КПД трансформатора $\eta = 80 \%$.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА	7
1.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда	7
1.2. Закон Кулона	9
1.3. Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля	9
1.4. Принцип суперпозиции электрических полей	12
1.5. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле	13
1.6. Потенциал и разность потенциалов электростатического поля	14
1.7. Электростатическое поле проводящей заряженной сферы(шара)	17
1.8. Электростатическое поле бесконечной однородно заряженной плоскости	18
1.9. Электроемкость уединенного проводника	18
1.10. Конденсаторы. Соединение конденсаторов	19
1.11. Энергия и плотность энергии электростатического поля	21
Тренировочные упражнения для закрепления теоретического материала	23
1. Методические указания по решению задач	23
2. Примеры решения задач	25
3. Задания для самостоятельной работы	36
3.1. Вопросы по теме «Электростатика»	36
3.2. Задачи для самопроверки	39
РАЗДЕЛ 2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК	44
2.1. Электропроводность. Сила тока	44
2.2. Сопротивление	45
2.3. Закон Ома для однородного участка цепи	48
2.4. Соединение проводников	49
2.5. Электродвижущая сила (ЭДС). Закон Ома для неоднородного участка цепи. Закон Ома для полной цепи	52
Энергетические превращения в электрической цепи	56
2.7. Электрический ток в электролитах	56
2.8. Электрический ток в газах	59
2.9. Полупроводники	61
1. Методические указания по решению задач	63
2. Примеры решения задач	64
3. Задания для самостоятельной работы	71
3.1. Вопросы по теме «Постоянный электрический ток»	71
3.2. Задачи для самопроверки	74
РАЗДЕЛ 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ	78
3.1. Индукция магнитного поля	78
3.2. Линии магнитной индукции	80
3.3. Магнитное поле проводников с током	81
3.4. Сила Ампера	82
3.5. Сила Лоренца	83
3.6. Движение заряженных частиц в магнитном поле	84

Магнитный поток.....	86
3.8. Закон электромагнитной индукции.....	86
3.9. Механизмы возникновения ЭДС индукции.....	89
3.10. Явление самоиндукции. Индуктивность.....	90
3.11. Энергия и плотность энергии магнитного поля.....	92
Тренировочные упражнения для закрепления теоретического материала..	92
1. Методические указания по решению задач.....	92
2. Примеры решения задач.....	93
3. Задания для самостоятельной работы.....	100
3.1. Вопросы к теме «Магнитное поле».....	100
3.2. Задачи для самопроверки.....	104
РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.....	110
4.1. Идеальный колебательный контур.....	110
4.2. Реальный колебательный контур.....	112
4.3. Вынужденные электромагнитные колебания.....	113
Цепи переменного тока и их особенности.....	115
4.4. Трансформатор.....	116
4.5. Электромагнитные волны.....	121
4.6. Шкала электромагнитных волн.....	123
Тренировочные упражнения для закрепления теоретического материала..	124
1. Методические указания по решению задач.....	124
2. Примеры решения задач.....	126
3. Задания для самостоятельной работы.....	135
3.1. Вопросы к теме «Электромагнитные колебания и волны».....	135
3.2. Задачи для самопроверки.....	136

Учебное издание

Малишевский Виктор Феликсович,
Луцевич Александр Александрович

ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Л. М. Корневская*
Компьютерная верстка *Д. В. Головач*
Техническое редактирование *А. В. Красуцкая*

Подписано в печать 15.10.2018. Формат 60×90 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 8,94. Уч.-изд. л. 6,32.

Тираж 100 экз. Заказ № 457.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-
вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/161 от 27.01.2014, № 2/41 от 29.01.2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.