

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. Ф. Новиков, Э. Г. Невзорова, Д. Ф. Нерадовский

СБОРНИК ЗАДАНИЙ ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕКТРОСТАТИКА, ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК, МАГНЕТИЗМ

*Допущено Научно-методическим Советом по физике Министерства
образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим
направлениям подготовки и специальностям*

Тюмень
ТюмГНГУ
2013

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73
Н 73

Рецензенты:

профессор, доктор физико-математических наук В.А. Табарин
профессор, доктор физико-математических наук В.О. Некучаев

Новиков, В.Ф.

К73 Сборник заданий по физике. Электростатика, постоянный электрический ток, магнетизм : учебное пособие / В.Ф. Новиков, Э.Г. Невзорова, Д.Ф. Нерадовский. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. — 140 с.

ISBN 978-5-9961-0764-3

Учебное пособие по электромагнетизму содержит основные формулы и определения физических величин, примеры решения задач, задачи для контрольных работ, а также вопросы и качественные задания в виде тестов для подготовки к экзамену.

На основе банка, содержащего свыше 500 задач, сформированы варианты контрольных работ, в которые включены задачи повышенной сложности.

Пособие предназначено для самостоятельной работы студентов как очной, так и заочной форм обучения всех специальностей в соответствии с программой курса физики технических ВУЗов. Кроме того, пособие может быть использовано студентами для подготовки к физическим олимпиадам.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

ISBN 978-5-9961-0764-3

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
профессионального образования
«Тюменский государственный
нефтегазовый университет», 2013

Содержание

Темы практических занятий.....	4
Таблицы контрольных заданий по электричеству.....	5
Таблицы контрольных заданий по магнетизму.....	8
1. Электростатика.....	11
1.1. Основные понятия и закономерности.....	11
1.2. Обозначения физических величин и единицы измерения.....	13
1.3. Примеры решения задач.....	14
1.4. Качественные задачи.....	24
1.5. Задачи для контрольных работ.....	31
1.6. Вопросы.....	44
2. Постоянный электрический ток.....	46
2.1. Основные понятия и закономерности.....	46
2.2. Обозначения физических величин и единицы измерения.....	48
2.3. Примеры решения задач.....	48
2.4. Качественные задачи.....	56
2.5. Задачи для контрольных работ.....	61
2.6. Вопросы.....	77
3. Электромагнетизм.....	77
3.1. Основные понятия и закономерности.....	77
3.2. Обозначения физических величин и единицы измерения.....	84
3.3. Примеры решения задач.....	85
3.4. Качественные задачи.....	94
3.5. Задачи для контрольных работ.....	103
3.6. Вопросы.....	135
Рекомендуемая литература.....	137

1. Электростатика

Раздел физики, изучающий взаимодействия неподвижных электрических зарядов, которые осуществляются посредством электростатического поля, называется **электростатикой**.

1.1. Основные понятия и закономерности

- Элементарный заряд

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

носитель отрицательного заряда – электрон (e^-), носитель положительного заряда – протон (p).

- Электрический заряд обладает свойством дискретности

$$q = n e.$$

- Электрические заряды считаются точечными, если линейные размеры тел, на которых эти заряды сосредоточены, во много раз меньше любых расстояний, рассматриваемых в данной задаче.
- Закон Кулона

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^3} \vec{r},$$

где $k = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$.

- Напряженность электрического поля – векторная величина, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Напряженность электрического поля точечного заряда: $\vec{E} = k \frac{q}{\varepsilon r^3} \vec{r}$.

- Потенциал электростатического поля в точке – скалярная физическая величина, численно равная работе, совершаемой кулоновской силой при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность

$$\varphi = \int_L \vec{F} d\vec{l} = q \int_L E \cos(\vec{E}, d\vec{l}) dl.$$

- Связь вектора напряженности электрического поля и потенциала электрического поля

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi = -\left(\vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right),$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – базисные орты декартовой системы координат.

- Объемная плотность электрического заряда

$$\rho = \frac{dq}{dV}.$$

- Поверхностная плотность электрического заряда

$$\sigma = \frac{dq}{dS}.$$

- Линейная плотность электрического заряда

$$\tau = \frac{dq}{dl}.$$

- Электрический дипольный момент

$$\vec{p} = q\vec{l}.$$

- Электрический дипольный момент неполярной молекулы во внешнем электрическом поле

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}.$$

- Вектор электрического смещения электрического поля (электрическая индукция)

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}.$$

- Поток вектора напряженности электрического поля, пронизывающего площадку S ,

$$\Phi_E = \int_S E \cos \alpha dS = \int_S E_n dS.$$

- Теорема Гаусса для электрического поля в вакууме

$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i,$$

в диэлектрике

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum_i q_i.$$

1.2. Обозначения физических величин и единицы измерения.

q – заряд, $[q] = Кл$.

N – число зарядов.

$\rho = \frac{dq}{dV}$ – объемная плотность электрического заряда, $[\rho] = \frac{Кл}{м^3}$.

$\sigma = \frac{dq}{dS}$ – поверхностная плотность электрического заряда, $[\sigma] = \frac{Кл}{м^2}$.

$\tau = \frac{dq}{dl}$ – линейная плотность электрического заряда, $[\tau] = \frac{Кл}{м}$.

$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$.

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{м}$ – электрическая постоянная.

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

F – сила.

E – напряженность электрического поля.

φ – потенциал электрического поля.

$\Delta\varphi = U$ – разность потенциалов, напряжение

W – энергия

A – работа силы.

C – емкость.

$\vec{\nabla}\varphi = grad \varphi$ – градиент потенциала.

$\vec{p} = q \cdot \vec{l}$ – дипольный электрический момент.

$\vec{n}$ – вектор нормали к поверхности.

$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S}$ – поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность.

$\omega = \frac{W}{V}$ – объемная плотность энергии.

$\vec{D}$ – вектор электрического смещения (электрической индукции).

$\vec{P}$ – вектор поляризации.

χ – диэлектрическая восприимчивость вещества.

1.3. Примеры решения задач

1. Два шарика одинакового радиуса и массы подвешены на нитях так, что их поверхности соприкасаются. После сообщения шарикам заряда $4 \cdot 10^{-7}$ Кл они оттолкнулись и разошлись на угол 60° . Определите массу шарика, если расстояние от точки подвеса до центра каждого шарика равно 20 см.

Дано:

$$q = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл.}$$

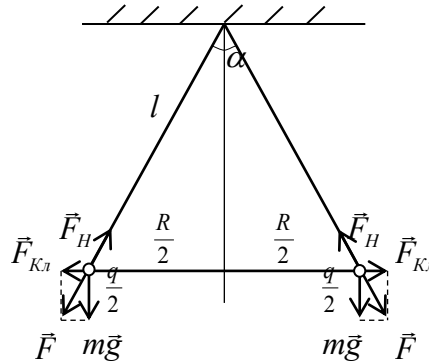
$$\alpha = 60^\circ.$$

$$l = 0,2 \text{ м.}$$

$$R_1 = R_2 = R$$

$$m = ?$$

Решение:



Сообщенный шарикам заряд q перераспределится между ними таким образом, что каждый шарик получит заряд $\frac{q}{2}$. Под действием кулоновской силы $F_{Kл}$ отталкивания шарики расходятся на расстояние R . По закону Кулона сила взаимодействия шариков:

$$F_{Kл} = k \frac{\left(\frac{q}{2}\right)^2}{R^2} = \frac{kq^2}{4R^2}. \quad (1)$$

На каждый шарик действует сила тяжести $m\vec{g}$. Результирующая сил $\vec{F}_{Kл}$ и $m\vec{g}$ – сила $\vec{F}$, уравнивает силу натяжения нити. Выразим $F_{Kл} = mg \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$. Подставим вместо $F_{Kл}$ выражение из (1)

$$k \frac{q^2}{4R^2} = mg \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad R = l \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = l \sin 30^\circ.$$

Выразим массу шарика

$$m = k \frac{q^2}{4gl^2 \sin^2 30^\circ \operatorname{tg} 30^\circ} = k \frac{q^2 \cos 30^\circ}{4gl^2 \sin^3 30^\circ}.$$

Проверим размерность

$$[m] = 1 \left[\frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2 \cdot \Phi \cdot \text{м}} \right] = 1 \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2} \right] = 1 \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2} \right] = 1 [\text{кг}].$$

$$m = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 16 \cdot 10^{-14} \sqrt{3} \cdot 8}{4 \cdot 10 \cdot 0,04} = 0,1 (\text{кг})$$

Ответ: масса шарика $m=100$ г.

2. Два положительных заряда q_1 и $q_2 = 6q_1$ находятся r в вакууме на расстоянии 10 см друг от друга. На каком расстоянии от первого заряда находится точка, в которой напряженность поля равна нулю? Определите положение этой точки, если второй заряд – отрицательный.

Дано:

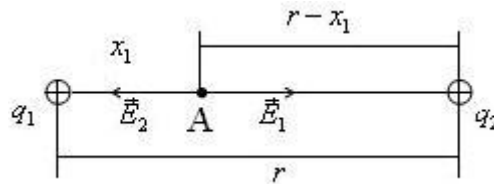
$$q_1$$

$$q_2 = 6q_1$$

$$r = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$x - ?$

Решение:



1) По условию напряженность $\vec{E}_2$ поля в точке A равна нулю. $E_A = 0$.

По принципу суперпозиции результирующая напряженность поля равна геометрической сумме напряженностей, создаваемых каждым зарядом в данной точке: $\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$, следовательно $\vec{E}_1 = -\vec{E}_2$, а модули их одинаковы.

Запишем значения напряженностей:

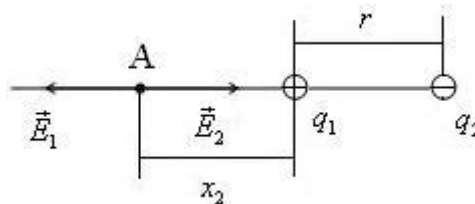
$$E_1 = k \frac{q_1}{x_1^2}; \quad E_2 = k \frac{6q_1}{(r - x_1)^2} \Rightarrow 6x_1^2 = (r - x_1)^2, \text{ извлечем корень из обеих частей}$$

$$r - x_1 = \sqrt{6} x_1,$$

$$0,1 - x_1 = 2,45 x_1$$

$$0,1 = 3,45 x_1, \quad x_1 = 0,1/3,45 \approx 0,03 \text{ (м)} = 3 \text{ (см)}$$

2) Если второй заряд отрицательный, то точка A окажется слева от двух зарядов.



Напряженность в точке A : $\vec{E}_A' = \vec{E}_1' + \vec{E}_2' = 0, \quad E_1' = E_2'.$

$$E_1' = k \frac{q_1}{x_2^2}; \quad E_2' = k \frac{6q_1}{(r + x_2)^2} \Rightarrow (r + x_2)^2 = 6x_2^2$$

$$r + x_2 = 2,45 x_2$$

$$x_2 = 0,1/1,45 \approx 0,069 \text{ (м)} = 7 \text{ (см)}$$

Ответ: 1) если оба заряда положительные, то точка A расположена между зарядами на $x_1 = 3$ см; 2) если $q_2 < 0$, точка расположена слева на протяжении линии r на $x_2 = 7$ см.

3. Четыре маленьких заряженных шарика находятся в состоянии равновесия так, что система зарядов образует ромб с острым углом α . Определите отношение зарядов соседних шариков.

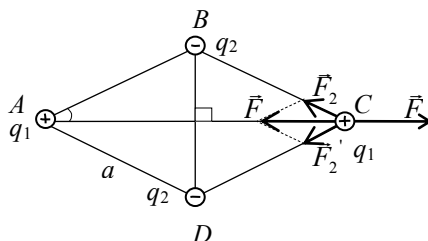
Дано:

$$n=4$$

$$q; \alpha$$

$$\frac{q_1}{q_2} = ?$$

Решение:



Чтобы вся система зарядов находилась в равновесии, необходимо, чтобы заряды $q_1 > 0$, а $q_2 < 0$. Рассмотрим условие равновесия зарядов на примере заряда, помещенного в точку C. Силы $|\vec{F}_2| = |\vec{F}_2'|$ притяжения к

отрицательному заряду. Их результирующая сила: $F' = 2F_2 \cos \frac{\alpha}{2}$

По закону Кулона модули сил $F_2 = F_2' = k \frac{q_1 q_2}{a^2}$,

где a – сторона ромба; $r = a \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$

Заряды в точках A и C одинаковы и между ними действует сила отталкивания:

$$F = k \frac{q_1^2}{\left(2a \cdot \cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} = k \frac{q_1^2}{4a^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}}$$

Заряды находятся в равновесии, поэтому приравняем правые части равенств:

$$k \frac{q_1^2}{4a^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} = 2k \frac{q_1 q_2}{a^2} \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$\frac{q_1}{q_2} = 8 \cos^3 \frac{\alpha}{2}$$

Ответ: отношение зарядов соседних шариков $q_1/q_2 = 8 \cos^3 \frac{\alpha}{2}$

4. Заряды по 10^{-6} Кл каждый находятся в вершинах квадрата со стороной 20 см. Определите разность потенциалов в поле этих зарядов между центром квадрата и серединой одной из его сторон.

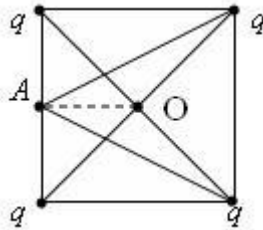
Дано:

$$q = 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$a = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$\varphi_{AO} = ?$$

Решение:



Каждый заряд, находясь на своем месте, создает потенциал φ_1 . Результирующий потенциал в точке O определяется по принципу суперпозиции, т.е. равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым зарядом: $\varphi_0 = 4\varphi_1$

Заряд отстоит от точки O на расстоянии $r_1 = \frac{r}{\sqrt{2}}$, тогда потенциал,

$$\text{создаваемый им в этой точке, } \varphi_1 = k \frac{q}{r} = k \frac{q\sqrt{2}}{a}, \text{ а } \varphi_0 = 4k \frac{q\sqrt{2}}{a}$$

В точке A на середине одной из сторон

$$\varphi_A = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = k \frac{2q}{a} + k \frac{2q}{\sqrt{\left(a^2 + \frac{a^2}{4}\right)^2}} = kq \left(\frac{4}{a} + \frac{2 \cdot 2}{a\sqrt{5}} \right) = \frac{kq}{a} (4\sqrt{5} + 4)$$

Разность потенциалов между точками A и O :

$$\varphi_{AO} = kq \left(\frac{4}{a} + \frac{4}{a\sqrt{5}} - \frac{4\sqrt{2}}{a} \right) = \frac{4kq}{a} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{5}} - \sqrt{2} \right)$$

Вычисление:

$$\varphi_{AO} = \frac{4 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6}}{0,2} \left(1 + \frac{1}{2,24} - 1,4 \right) = 180 \cdot 10^3 (1 + 0,446 - 1,4) = 8,36 \cdot 10^3 \text{ (В)}$$

Ответ: разность потенциалов между точками A и O $\Delta\varphi = 8,36 \text{ кВ}$.

5. Шар, погруженный в масло, диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon = 4$, имеет потенциал 4500 В и поверхностную плотность заряда $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$. Определить радиус, заряд, емкость и энергию электрического поля шара.

Дано:

$$\varepsilon = 4, \sigma = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2 = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ Кл/м}^2, \varphi = 4500 \text{ В}, \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

$$R - ? \quad q - ? \quad C - ? \quad W - ?$$

Решение:

1. Потенциал шара определяется по формуле: $\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r}$, где $r = R$, $q = \sigma S$ – заряд, равномерно распределенный по поверхности шара, $S = 4\pi R^2$ – площадь поверхности шара. Таким образом, потенциал электрического поля: $\varphi = k \frac{4\sigma\pi R}{\varepsilon}$, откуда выразим радиус шара

$$R = \frac{\varphi \varepsilon}{4\pi \sigma k} = \frac{4\varepsilon \varepsilon_0 \varphi}{\sigma}.$$

2. Заряд шара: $q = 4\pi \sigma R^2$.

3. Емкость шара: $C = \frac{q}{\varphi}$.

4. Энергия электрического поля шара: $W = \frac{q^2}{2C}$.

Вычисление:

$$1. R = \frac{4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4500}{3,4 \cdot 10^{-2}} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}$$

$$2. q = 4 \cdot 3,14 \cdot (4,7 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-2} = 9,4 \cdot 10^{-12} \text{ (Кл)}$$

$$3. C = \frac{9,4 \cdot 10^{-12}}{4500} = 2 \cdot 10^{-15} \text{ (Ф)}$$

$$4. W = \frac{(9,4 \cdot 10^{-12})^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-15}} = 22 \cdot 10^{-9} \text{ (Дж)}$$

Ответ: $R = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}$, $q = 9,4 \cdot 10^{-12} \text{ (Кл)}$, $C = 2 \cdot 10^{-15} \text{ (Ф)}$, $W = 22 \cdot 10^{-9} \text{ (Дж)}$.

6. На бесконечном тонкостенном цилиндре, диаметром 10 см, равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью 2 мкКл/м^2 . Определите напряженность электрического поля в точке, отстоящей от поверхности цилиндра на расстоянии 12 см.

Дано:

$$d = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

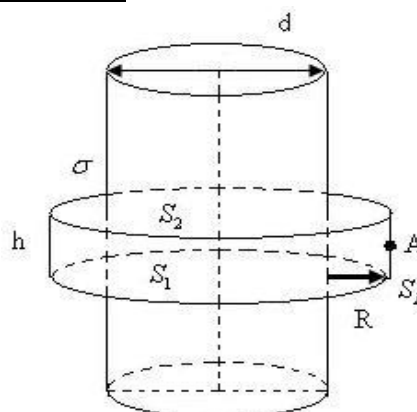
$$\sigma = 2 \text{ мкКл/м}^2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$$

$$R = 12 \text{ см} = 0,12 \text{ м}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$E(A) - ?$$

Решение:



Построим вспомогательную поверхность (поверхность Гаусса) – цилиндр, проходящий через точку А, в которой необходимо определить напряженность электрического поля $E(A)$. Радиус цилиндрической поверхности: $r = \frac{d}{2} + R$.

Найдем поток вектора напряженности электрического поля через вспомогательную поверхность.

$$\Phi_E = \oiint_S E_n dS = \int_{S_R} E_n dS + \int_{S_1} E_{n1} dS + \int_{S_2} E_{n2} dS \quad (1)$$

Учтем, что силовые линии напряженности электрического поля создаваемого бесконечным цилиндром, перпендикулярны боковой поверхности цилиндра. А это значит, что E_{n1} , E_{n2} – нормальные составляющие вектора напряженности электрического поля, на поверхностях оснований вспомогательной поверхности обращаются в нуль: $E_{n1} = E_{n2} = 0$.

Таким образом, последние два интеграла в (1) равны нулю и выражение для потока примет следующий вид:

$$\Phi_E = \int_{S_R} E_n dS = E S_R = E \cdot 2\pi r h, \quad (2)$$

где $S_R = 2\pi r h$ – площадь боковой поверхности цилиндра, проходящего через точку А, r – ее радиус.

Согласно теореме Остроградского-Гаусса

$$\Phi_E = \int_{S_R} E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{S_R} q \quad (3)$$

Электрический заряд, заключенный внутри вспомогательной поверхности:

$$\sum_{S_R} q = \sigma S = \sigma \cdot \pi \cdot h \cdot d, \quad (4)$$

где S – площадь боковой поверхности заряженного цилиндра.

Приравниваем правые части уравнений (2) и (3)

$$E \cdot 2\pi r h = \frac{\sigma \pi h d}{\epsilon_0},$$

и выражаем напряженность электрического поля:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot \frac{d}{2r} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot \frac{d}{d + 2R}.$$

Проверим размерность полученного выражения:

$$[E] = 1 \left[\frac{Кл}{м^2} \cdot \frac{м}{Ф} \cdot \frac{м}{м} \right] = 1 \left[\frac{Кл \cdot В}{Кл \cdot м} \right] = 1 \left[\frac{В}{м} \right].$$

Вычисление:

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 10^{12}}{8,85(0,1 + 2 \cdot 0,12)} = 66,5 (\kappa B / м).$$

Ответ: величина напряженности электрического поля в точке А, $E(A) = 66,5 (\kappa B / м)$.

7. Электрическое поле образовано положительно заряженной бесконечно длинной нитью. Двигаясь, под действием поля по силовой линии от точки, находящейся на расстоянии $x_1 = 1 \text{ см}$ от нити, до точки $x_2 = 4 \text{ см}$, α -частица изменила свою скорость от $2 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ до $3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Определить линейную плотность зарядов на нити.

Дано:

$$x_1 = 0,01 \text{ м}$$

$$x_2 = 0,04 \text{ м}$$

$$q_\alpha = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

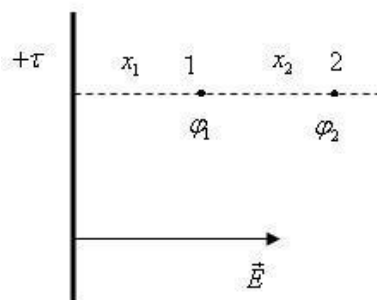
$$v_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

Решение:



$\tau - ?$

α -частица – это ядро атома гелия, заряд которого $q_\alpha = 2e^- = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Силовые линии электрического поля, созданного заряженной нитью, перпендикулярны нити и вектор напряженности поля направлен от нити. При движении вдоль силовой линии кинетическая энергия α -частицы увеличилась за счет работы кулоновских сил электрического поля:

$$\Delta W_k = A_{кл}$$

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = q_\alpha (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1)$$

где φ_1, φ_2 – потенциалы точек 1 и 2. Выразим зависимость потенциала поля от координаты x , и плотности распределения зарядов на нити.

Напряженность электрического поля связана с изменением потенциала электрического поля соотношением: $E = -\frac{d\varphi}{dx}$, откуда

$$d\varphi = -E(x) dx. \quad (2)$$

Воспользуемся выражением для величины напряженности электрического поля заряженной нити, в зависимости от расстояния от нити до точки наблюдения поля:

$$E(x) = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{x}, \quad (3)$$

где τ – линейная плотность заряда на нити. Подставим (2) в (1) и проинтегрируем полученное уравнение от точки 1 до точки 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E(x) dx = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right).$$

Полученное выражение для разности потенциалов поля подставим в уравнение (1) и выразим искомую линейную плотность электрического заряда на нити:

$$\frac{m v_2^2}{2} - \frac{m v_1^2}{2} = q_a \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right),$$

$$\tau = \frac{m(v_2^2 - v_1^2)\pi\epsilon_0}{q \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right)}.$$

Проверим размерность полученного выражения:

$$[\tau] = 1 \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \Phi}{\text{Кл} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}} \right] = 1 \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} \right] = 1 \left[\frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right] = 1 \left[\frac{\text{Кл}}{\text{м}} \right].$$

Вычисление:

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,64 \cdot 10^{-27} (900 - 4) \cdot 10^{10}}{3,2 \cdot 10^{-19} \ln 4} = 3,37 \left(\frac{\text{мкКл}}{\text{м}} \right).$$

Ответ: линейная плотность заряда на нити: $\tau = 3,37 \left(\frac{\text{мкКл}}{\text{м}} \right)$

8. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора 3000 В. Пространство между ними заполнено парафином толщиной 5 мм, с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$. Определить напряженность электрического поля в парафине, его диэлектрическую восприимчивость и плотность связанных зарядов на его поверхности.

Дано:

$$U = 3000 \text{ В}, \quad d = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \epsilon = 2.$$

$$E' - ? \quad \chi - ? \quad \sigma' - ?$$

Решение:

1) Напряженность электрического поля в диэлектрике:

$$E' = \frac{E}{\epsilon}, \quad E = \frac{U}{d}, \quad E' = \frac{U}{d\epsilon}, \quad E' = \frac{3000}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 3 \cdot 10^5 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

2) Диэлектрическая восприимчивость связана с диэлектрической проницаемостью соотношением: $\chi = \epsilon - 1 = 2 - 1 = 1$, $\chi = 1$.

3) Поверхностная плотность связанных зарядов связана с поляризуемостью диэлектрика:

$$\sigma' = P = \chi \epsilon_0 E'.$$

Учитывая выражение для величины E' , получим следующий результат:

$$\sigma' = \chi \varepsilon_0 E' = \chi \varepsilon_0 \frac{U}{d\varepsilon}, \quad \sigma' = 1,8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{3000}{5 \cdot 10^3 \cdot 2} = 2,66 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right).$$

Ответ: $E' = 3 \cdot 10^5 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}} \right)$, $\chi = 1$, $\sigma' = 2,66 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right)$.

9. Найти потенциал электрического поля в точке, находящейся на высоте $h/2$ над металлической поверхностью, в двух случаях:

а) плоскость заряжена с поверхностной плотностью заряда σ ;

б) плоскость не заряжена, а на высоте h находится точечный заряд $+e$.

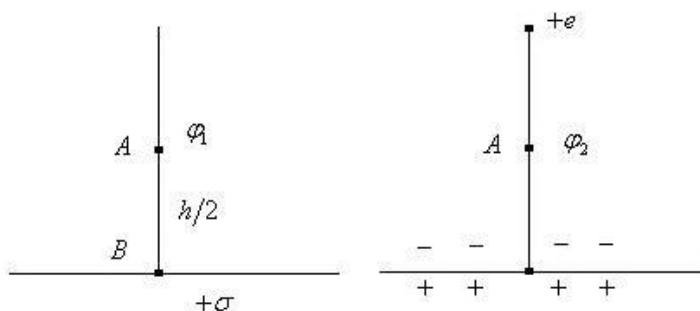
Дано:

$h, h/2$

$\sigma, q = +e$

$\varphi_1 - ? \quad \varphi_2 - ?$

Решение:



а) Электрическое поле созданное металлической плоскостью однородно, напряженность его $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$, связь напряженности и разности потенциалов

$$\Delta\varphi = E \frac{h}{2} = \frac{\sigma h}{4\varepsilon_0},$$

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B = \varphi_1 - 0 = \frac{\sigma h}{4\varepsilon_0}.$$

б) Если над незаряженной плоскостью поместить электрический заряд $+e$, то на плоскости будет индуцироваться заряд, эквивалентный «фиктивному» точечному заряду $-e$, с верхней стороны плоскости, и $+e$ с нижней стороны. Точечный «фиктивный» заряд расположен симметрично данному заряду $+e$, относительно плоскости. Потенциал в точке A будет складываться из потенциалов точечных зарядов $+e$ и $-e$.

$$\varphi_2 = \varphi_{+e} + \varphi_{-e} = k \frac{e}{\left(\frac{h}{2}\right)} - k \frac{e}{\left(\frac{h}{2} + h\right)} = \frac{2e}{4\pi\varepsilon_0 h} - \frac{2e}{4\pi\varepsilon_0 \cdot 3h} = \frac{e}{3\pi\varepsilon_0 h}.$$

Ответ: а) $\varphi_1 = \frac{\sigma h}{4\varepsilon_0}$, $\varphi_2 = \frac{e}{3\pi\varepsilon_0 h}$.

10. Определить емкость батареи конденсаторов:

Дано:

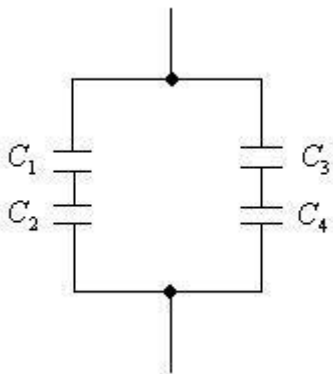
$$C_1 = 2 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 6 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = 8 \text{ мкФ}$$

$$C_4 = 5 \text{ мкФ}$$

$C = ?$



Решение:

Батарея конденсаторов состоит из параллельно соединенных ветвей последовательно соединенных конденсаторов.

Емкость последовательно соединенных конденсаторов:

$$C_{1-2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}, \quad C_{3-4} = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}.$$

$$\text{Емкость всей батареи конденсаторов: } C = C_{1-2} + C_{3-4} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}.$$

Вычисление:

$$C = \frac{2 \cdot 8}{2 + 8} + \frac{6 \cdot 5}{6 + 5} = 4,327 (\text{мкФ}).$$

Ответ: $C = 4,327 (\text{мкФ}).$

11. Плоский конденсатор состоит из двух пластин, разделенных стеклом, с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 7$. Какое давление производят пластины на стекло перед пробоем, если напряженность электрического поля $E = 50 \cdot 10^6 \text{ В/м}$?

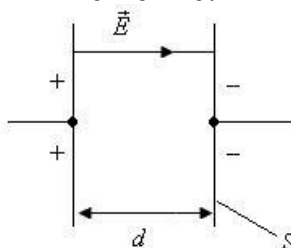
Дано:

$$\varepsilon = 7$$

$$E = 50 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

$P = ?$

Решение:



Между пластинами плоского конденсатора создается однородное электрическое поле напряженностью $\vec{E}$. Каждая пластина находится в поле другой пластины и притягивается к ней с силой, $F = A/d = W/d$, где A – работа по перемещению пластины на расстояние d .

Давление, которое оказывают пластины на стекло, определяется по формуле: $P = \frac{F}{S}$.

Работа A совершается за счет энергии электрического поля конденсатора:

$A = W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} V$, тогда, $P = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2 V}{2 S d} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} = \omega$, следовательно, давление пластин на диэлектрик равно объемной плотности энергии электрического поля.

Проверка размерности:

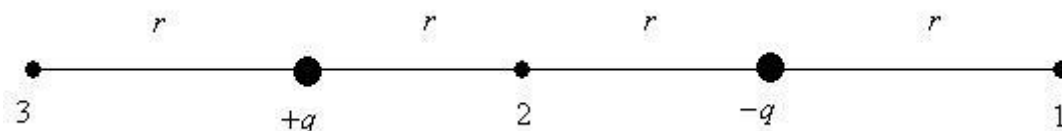
$$[P] = 1 \left[\frac{\Phi B^2}{\text{м м}^2} \right] = 1 \left[\frac{\text{Кл В}^2}{\text{В м м}^2} \right] = 1 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right] = 1 \left[\frac{\text{Н м}}{\text{м}^3} \right] = 1 \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] = 1 [\text{Па}].$$

Вычисление:

$$P = \frac{7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 25 \cdot 10^{14}}{2} = 77,4 \left(\frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \right).$$

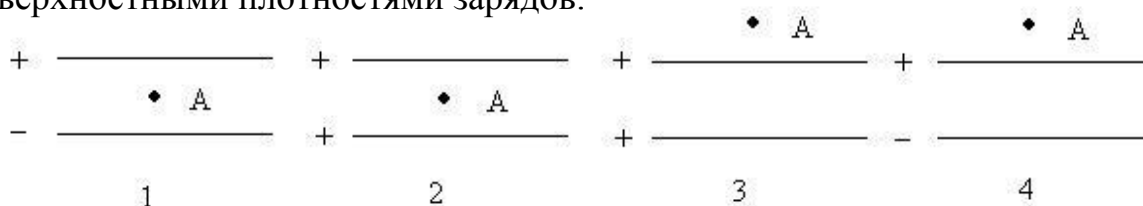
1.4. Качественные задачи

1.4.1. Два равных заряда противоположных знаков создают электростатическое поле:



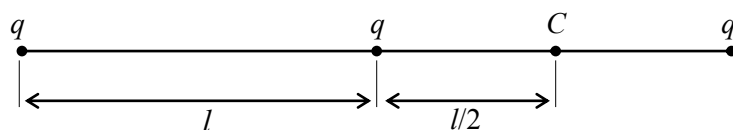
В какой из отмеченных трех точек (1, 2, 3) напряженность электрического поля принимает максимальное значение? В какой максимален потенциал?

1.4.2. На рисунках изображены участки бесконечно больших параллельных друг другу равномерно заряженных плоскостей с одинаковыми поверхностными плотностями зарядов:



На каком из рисунков в т. А напряженность электрического поля равна нулю?

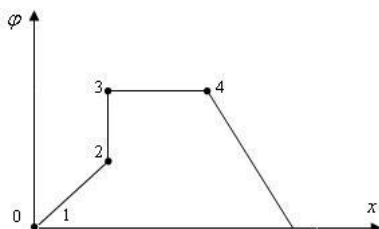
1.4.3. Три равных по величине и знаку заряда расположены в вакууме вдоль прямой на расстоянии l друг от друга. Модуль напряженности поля, созданного зарядами в точке С, равен:



- 1) $\frac{3q}{4\epsilon_0 l^2}$; 2) $\frac{q}{4\pi\epsilon_0 l^2}$; 3) $\frac{q}{9\pi\epsilon_0 l^2}$; 4) $\frac{5q}{4\pi\epsilon_0 l^2}$; 5) $\frac{q}{4\pi l^2}$.

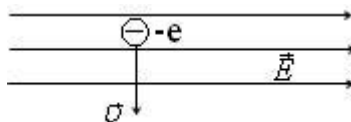
1.4.4. На рисунке показана зависимость потенциала электрического поля от координат. Напряженность поля равна нулю на участке:

- 1) 1-2 и 4-5; 2) 2-3 и 3-4;
3) 2-3;
4) 3-4;
5) на всех участках отлична от нуля.

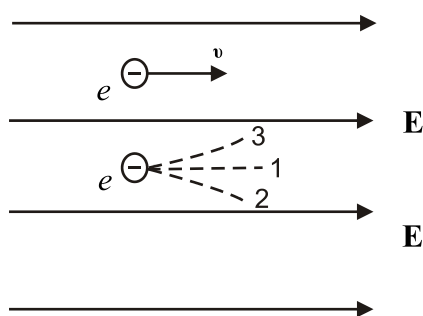


1.4.5. Электрон движется перпендикулярно силовым линиям $\vec{E}$. Сила, действующая на электрон, направлена:

- 1) вправо по направлению $\vec{E}$;
2) влево против направления $\vec{E}$;
3) вниз по направлению $\vec{v}$;
4) вверх против направления $\vec{v}$;
5) перпендикулярно рис. от «нас».

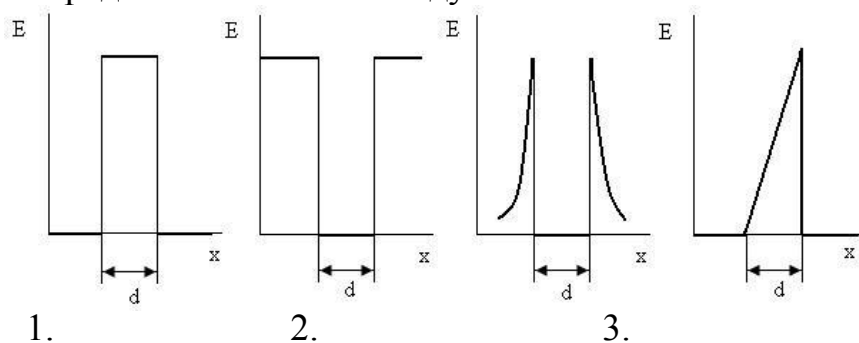


1.4.6. Электрон влетает в область однородного электрического поля, и будет двигаться:



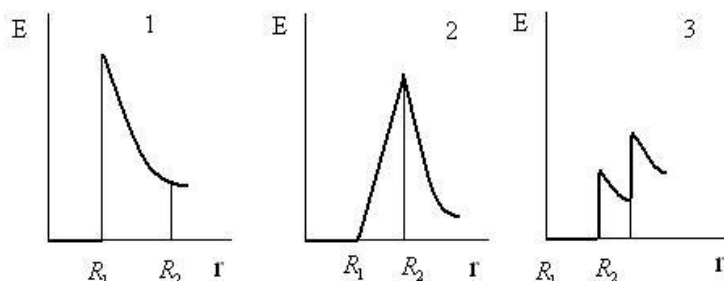
- 1) по траектории 1 равномерно;
2) по траектории 1 ускоренно;
3) по траектории 2 ускоренно;
4) по траектории 1 замедленно;
5) по траектории 3 замедленно.

1.4.7. Электрическое поле образовано двумя бесконечными плоскостями, заряженными противоположно, но с одинаковой поверхностной плотностью зарядов. Расстояние между плоскостями d .



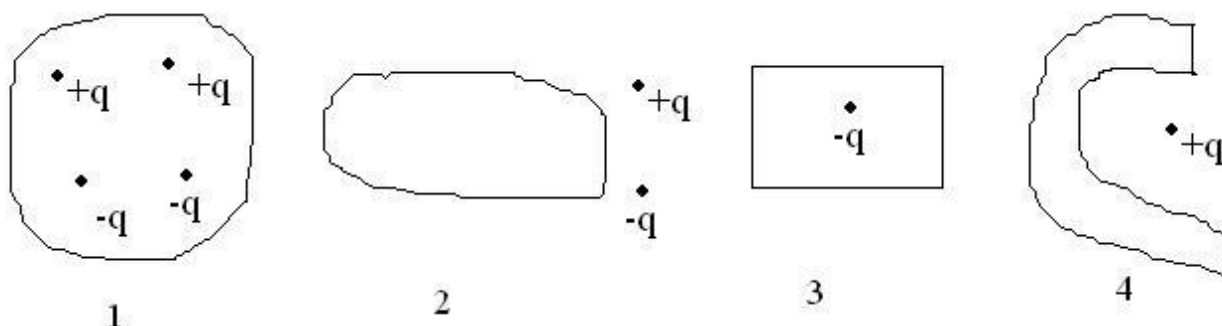
На каком из рисунков правильно показана зависимость напряженности электрического поля от расстояния? Объяснить ответ.

1.4.8. Две металлические тонкие концентрические сферы радиусов R_1 , R_2 заряжены положительно. На рисунках показаны различные зависимости напряженности электрического поля от расстояния до общего центра сфер.



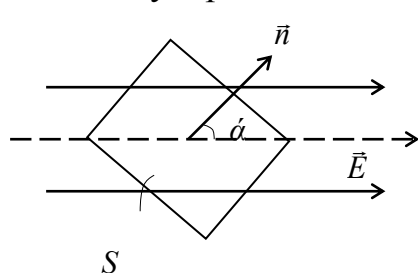
На каком рисунке зависимость правильная? Объясните ответ.

1.4.9. На рисунке изображены заряды, которые создают электрическое поле, и сечения замкнутых плоскостей:



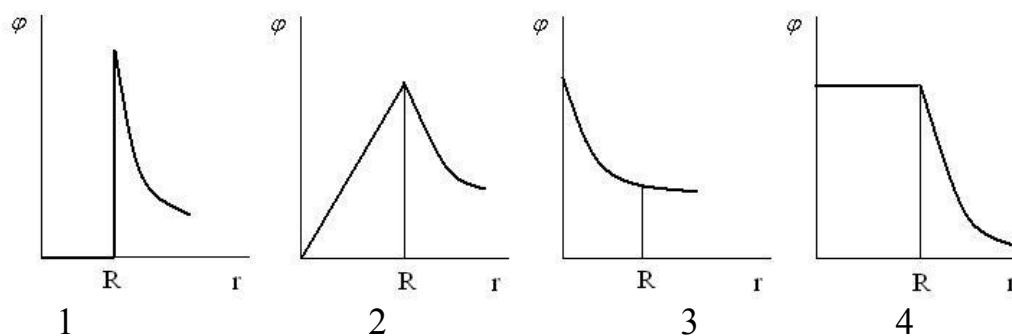
На каких рисунках поток вектора $\vec{E}$ через замкнутые поверхности отличен от нуля и почему?

1.4.10. Поток вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ через площадку S равен:



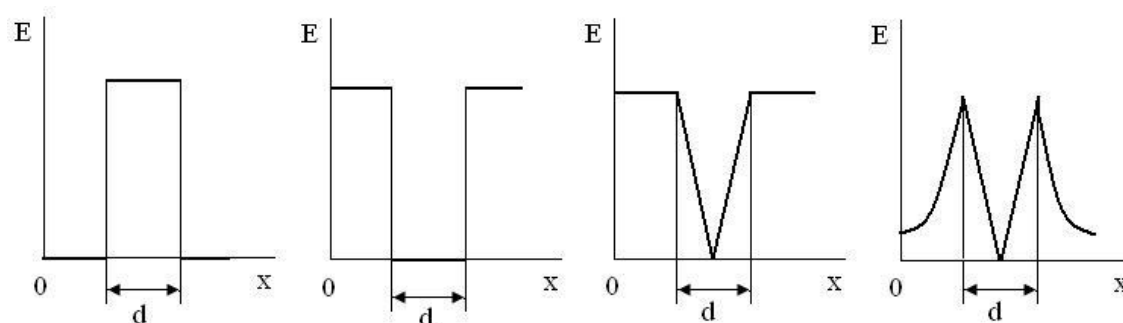
- 1) $\Phi_E = 0$;
- 2) $\Phi_E = ES \sin \alpha$;
- 3) $\Phi_E = ES \cos \alpha$;
- 4) $\Phi_E = ES \sin(90^\circ - \alpha)$;
- 5) $\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S}$.

1.4.11. Тонкостенный металлический шар радиуса R заряжен. На каком из приведенных ниже рисунков правильно показана (качественно) зависимость $\varphi(|\vec{r}|)$, где φ – потенциал электрического поля точки пространства, определяемой радиусом вектором $\vec{r}$, $|\vec{r}| = r$ – расстояние от точки до центра шара?



1.4.12. Расстояние между пластинами заряженного плоского воздушного конденсатора, отключенного от источника напряжения, увеличили. Покажите, изменятся ли напряженность электрического поля в конденсаторе, энергия поля конденсатора, разность потенциалов между пластинами.

1.4.13. Электрическое поле образовано большим плоским слоем диэлектрика конечной толщины d , равномерно заряженного по объему. На рисунках показано изменение напряженности электрического поля вдоль направления Ox , перпендикулярно слою диэлектрика. Выберите правильный рисунок.



1.4.14. Электрическое поле образовано точечными зарядами. Что представляет собой геометрическое место точек с одинаковой по модулю напряженностью?

1.4.15. Останется ли электрическое поле однородным, если в него внести проводящий шар?

1.4.16. Два одинаковых по величине и знаку электрических заряда образуют электрическое поле. Какой будет напряженность в точке середины отрезка прямой, соединяющей заряды?

1.4.17. Почему нарушается однородность электрического поля заряженного плоского конденсатора, если между его пластинами поместить незаряженный металлический шар?

1.4.18. Можно ли на электроскопе получить положительный заряд, имея эбонитовую палочку, заряженную отрицательно?

1.4.19. Что произойдет с поверхностной плотностью электрического заряда на металлическом листе, если ему придать цилиндрическую форму?

1.4.20. Изменится ли сила взаимодействия между двумя точечными зарядами, если каждый заряд и расстояние между ними уменьшить в два раза?

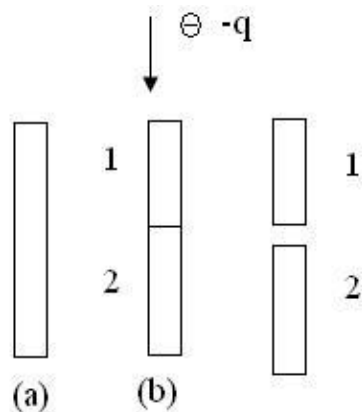
1.4.21. Если к нейтральному бузиновому шарiku, подвешенному на нити, поднести, не касаясь его поверхности, отрицательно заряженную резиновую палочку, то шарик:

- останется на месте;
- отклонится в противоположную сторону от палочки;
- притянется к палочке;
- соприкоснется с палочкой и «прилипнет» к ней.

1.4.22. Если отрицательно заряженную палочку поднести к электроскопу то:

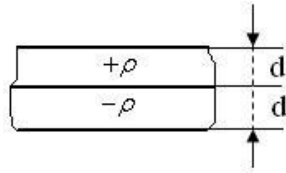
- шар электроскопа зарядится отрицательно;
- шар электроскопа зарядится положительно, лепестки электроскопа – отрицательно;
- один лепесток зарядится отрицательно, другой – положительно;
- и шар и лепестки зарядятся положительно.

1.4.23. Если к незаряженному проводнику (а) поднести отрицательный заряд ($-q$) (b), а затем проводник разрезать на две равные части, то:



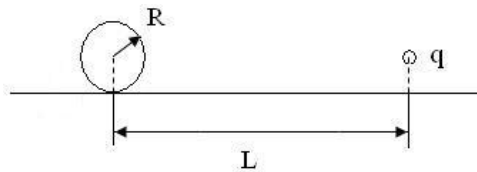
- половины проводника 1 и 2 будут нейтральными;
- обе половины зарядятся одним и тем же зарядом ($+q$);
- проводник 1 зарядится положительно, проводник 2 – отрицательно;
- проводник 1 зарядится отрицательно, проводник 2 – положительно.

1.4.24. Две пластины из одного материала, толщины d , заряжены равномерно по объему с объемными плотностями ρ , $-\rho$, и сложены вместе. Напряженность результирующего поля:



- равна нулю;
- $E_{\max} = \frac{2\rho}{\varepsilon_0}$;
- $E_{\max} = \frac{\rho d}{\varepsilon_0}$;
- $E_{\max} = \frac{\rho d}{2\varepsilon_0}$.

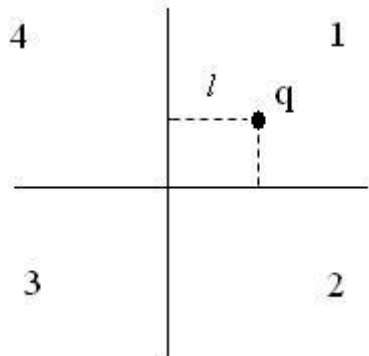
1.4.25. Точечный заряд q находится на расстоянии L от центра изолированного металлического шара, радиуса $R \ll L$. Шар не заряжен.



Потенциал шара:

- равен нулю;
- имеет знак, противоположный знаку заряда;
- $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 L}$.

1.4.26. Две бесконечные проводящие плоскости, пересекаясь под прямым углом, делят пространство на 4 области.



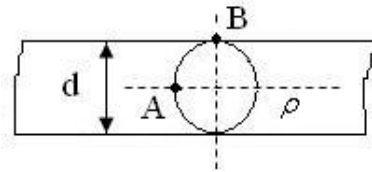
В 1-й области находится заряд q на расстоянии l от плоскости. Электрическое поле в остальных областях:

- во 2-й поле больше, чем в 3-й;
- в 4-й поле больше, чем в 3-й;
- отсутствует;
- во всех трех областях одинаково.

1.4.27. Металлический шар радиуса R_1 , заряженный до потенциала φ , окружили концентрической, проводящей, незаряженной оболочкой радиуса R_2 . Если оболочку заземлить, то потенциал шара:

- не изменится;
- станет равным нулю;
- изменится и станет равным $\varphi_1 = \varphi \frac{R_1}{R_2}$;
- изменится и станет равным $\varphi_1 = \varphi \frac{R_2 - R_1}{R_2}$.

1.4.28. В равномерно заряженной с положительной объемной плотностью заряда ρ пластине вырезана сферическая полость.



Напряженность электрического поля в точках А и В

- одинакова;
- в точке А напряженность больше и равна $E_A = \frac{\rho d}{\varepsilon_0}$;
- в точке В напряженность больше и равна $E_B = \frac{\rho d}{3\varepsilon_0}$;
- векторы напряженностей в точках А и В взаимно перпендикулярны.

1.4.29. Если незаряженное диэлектрическое тело внести в поле отрицательного заряда $-q$, а затем разделить на части А и В, то:

- А и В заряжены положительно;
- А и В заряжены отрицательно;
- А и В нейтральны;
- А заряжено положительно, В – отрицательно;
- А заряжено отрицательно, В – положительно.

1.4.30. Конденсатор, между пластинами которого находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε , присоединен к источнику постоянного напряжения. Как изменится энергия конденсатора, если из него удалить диэлектрик? Объясните, за счет чего изменяется энергия.

1.5. Задачи для контрольных работ

Электрический заряд. Электрическое поле. Закон Кулона. Напряженность поля. Принцип суперпозиции

1.5.1. Точки A , B , C и D находятся на одной прямой. Причем $AB = BC = CD = 10$ см. В точках A и C расположены заряды $q_A = +2 \cdot 10^{-6}$ Кл, $q_C = -15 \cdot 10^{-6}$ Кл. Определите напряженность и потенциал поля в точках B и D .

1.5.2. Два шарика одинакового радиуса и массы подвешены на нитях так, что их поверхности соприкасаются. После сообщения шарикам заряда $4 \cdot 10^{-7}$ Кл они оттолкнулись друг от друга и разошлись на угол 60 градусов. Найдите массу шарика, если расстояние от точки подвеса до центра каждого из шариков равно 20 см.

1.5.3. В вершинах квадрата $ABCD$ со стороной 25 см находятся заряды: $q_A = q_B = +100 \cdot 10^{-6}$ Кл, $q_C = q_D = -100 \cdot 10^{-6}$ Кл. Вычислите напряженность и потенциал электростатического поля в центре квадрата.

1.5.4. Расстояние между двумя точечными зарядами $q_1 = 22,5 \cdot 10^{-6}$ Кл и $q_2 = -44 \cdot 10^{-6}$ Кл равно 5 см. Найдите напряженность и потенциал поля в точке, находящейся на расстоянии 3 см от положительного заряда и 4 см от отрицательного заряда.

1.5.5. Два шарика одинакового радиуса и массы подвешены на двух нитях так, что их поверхности соприкасаются. Какой заряд нужно сообщить шарикам, чтобы натяжение каждой нити стало равно $0,098$ Н? Расстояние от точки подвеса до центра каждого шарика равно 10 см. Масса шарика $5 \cdot 10^{-3}$ кг.

1.5.6. В точках A и B помещены заряды $q_A = -5 \cdot 10^{-6}$ Кл и $q_B = +20 \cdot 10^{-6}$ Кл. Найдите на прямой, проходящей через эти заряды, ближайшую к точке A точку C , в которой напряженность поля равна нулю. $AB = 10$ см.

1.5.7. Три заряда q_1 , q_2 и q_3 , лежащие на одной прямой, связаны между собой нитями длиной L . Определите силу натяжения этих нитей.

1.5.8. Свинцовый шарик диаметром $0,3$ см помещен в глицерин, плотность которого $1,26$ г/см³. Определите заряд шарика, если в однородном электростатическом поле он взвешен в глицерине. Поле напряженностью 4 кВ/см, направлено вверх. Диэлектрическая проницаемость глицерина 39 .

1.5.9. Определите напряженность поля, создаваемого диполем с электрическим моментом $1 \text{ нКл} \cdot \text{м}$, на расстоянии 20 см от центра диполя в направлении, перпендикулярном оси диполя.

1.5.10. Две длинные прямые нити параллельны друг другу и находятся на расстоянии $R = 10 \text{ см}$ друг от друга. На них равномерно распределены заряды с линейными плотностями $\tau_1 = 0,7 \text{ мКл/м}$ и $\tau_2 = 10 \text{ мКл/м}$. Определите напряженность поля в точке, удаленной от первой нити на расстоянии 4 см , а от второй на расстоянии 8 см .

1.5.11. К бесконечной равномерно заряженной вертикальной плоскости подвесили на нити одноименно заряженный шарик массой 100 мг и зарядом $0,5 \text{ мКл}$. Определите поверхностную плотность заряда на плоскости, если натяжение нити, на которой висит шарик, равняется 1 мН .

1.5.12. По тонкому кольцу радиуса $R = 8 \text{ см}$ равномерно распределен заряд 50 нКл . Определите напряженность поля в точке на оси кольца, удаленной на расстоянии 15 см от центра кольца.

1.5.13. На бесконечном тонкостенном цилиндре диаметром $d = 10 \text{ см}$ равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью $\sigma = 2 \text{ мКл/м}^2$. Определите напряженность поля в точке, отстоящей от поверхности цилиндра на расстоянии 12 см .

1.5.14. Две параллельные металлические пластины, расположенные в диэлектрике ($\epsilon = 2,2$), обладают поверхностной плотностью заряда 3 мКл/м и 2 мКл/м . Определите напряженность электрического поля между и вне пластин.

1.5.15. Кольцо из тонкой проволоки разрывается, если на нем находится заряд q . При какой величине заряда разорвется кольцо, если диаметр кольца и диаметр проволоки увеличить в два раза?

1.5.16. Какой заряд необходимо сообщить мыльному пузырю радиусом 6 мм , чтобы он стал раздуваться? Коэффициент поверхностного натяжения мыльной пленки равен $40 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

1.5.17. Незаряженный металлический цилиндр вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью ω . Определите напряженность E электрического поля цилиндра на расстоянии R от его оси. Заряд и масса электрона равны соответственно q и m .

1.5.18. Два заряда q_1 и $q_2 = 6q_1$ находятся в вакууме на расстоянии 10 см друг от друга. На каком расстоянии от первого заряда находится точка, в которой напряженность поля равна нулю? Определите положение этой точки в случае, когда второй заряд отрицательный.

1.5.19. Электростатическое поле создается двумя бесконечными параллельными плоскостями, заряженными равномерно одноименными зарядами с поверхностными плотностями $\sigma_1 = 2 \text{ нКл/м}^2$ и $\sigma_2 = 4 \text{ нКл/м}^2$. Определите напряженность электростатического поля: 1) между плоскостями, 2) за пределами плоскостей. Постройте график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной плоскостям, если расстояние между ними $d = 1 \text{ см}$.

1.5.20. Две бесконечные пластины расположены под прямым углом друг к другу и несут равномерно распределенные по поверхностям заряды с плотностями $\sigma_1 = 10^{-3} \text{ мкКл/м}^2$ и $\sigma_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мкКл/м}^2$. Определите напряженность электрического поля, создаваемого пластинами.

1.5.21. Два заряда $q_1 = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ и $q_2 = -0,6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ находятся на расстоянии 36 см друг от друга. Определите напряженность поля в точке, лежащей посередине между зарядами. Чему станет, равна напряженность в этой точке, если второй заряд изменит знак на противоположный?

1.5.22. Точечный заряд $q = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ находится на расстоянии 2 мм от большой равномерно заряженной пластины. Определите силу, действующую на заряд, если поверхностная плотность заряда пластины равна $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$.

1.5.23. На двух одинаковых капельках воды находятся по два лишних электрона. При этом сила электрического отталкивания капелек уравнивает силу их взаимного тяготения. Определите радиусы капелек.

1.5.24. Три одинаковых одноименных заряда расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой противоположного знака заряд нужно поместить в центре треугольника, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

1.5.25. Три одинаковых заряда по $0,7 \text{ мкКл}$ каждый, расположены в вершинах прямоугольного треугольника с катетами 30 и 60 см. Вычислите напряженность электрического поля, создаваемого всеми зарядами в точке пересечения гипотенузы с перпендикуляром, опущенным на нее из вершины прямого угла.

1.5.26. Шар радиусом 10 см заряжен равномерно с объемной плотностью 10 нКл/м^3 . Определите напряженность электростатического поля: 1) на расстоянии 5 см от центра шара, 2) 15 см от центра шара. Постройте график зависимости $E = f(r)$.

1.5.27. Две параллельные металлические пластины площадью S каждая имеют заряды q_1 и q_2 . Вычислите поверхностную плотность зарядов, пренебрегая эффектом стекания их с краев пластины.

1.5.28. Две плоские пластины площадью 300 см^2 каждая, имеющие равные заряды, притягиваются в керосине с силой $0,26 \text{ Н}$. Считая, что расстояние между пластинами мало, Определите величины находящихся на них зарядов. Диэлектрическая проницаемость керосина равна 2.

1.5.29. Полусфера равномерно заряжена с поверхностной плотностью заряда σ . Определите напряженность поля в центре основания полусферы.

1.5.30. Фарфоровому шарiku радиусом 5 см сообщен заряд 2 мКл . Определите напряженность поля на расстоянии 5 см, 10 см, 15 см и 25 см от центра шара. Постройте график зависимости $E = f(r)$.

1.5.31. Тонкий прямой стержень длиной 15 см равномерно заряжен с линейной плотностью $0,1 \text{ мКл/м}$. На продолжении оси стержня, на расстоянии 10 см от ближайшего конца находится заряд 10 нКл . Определите силу взаимодействия заряда и стержня.

1.5.32. Плоский конденсатор находится во внешнем однородном электрическом поле с напряженностью $E = 10^3 \text{ В/м}$, перпендикулярном пластинам. Площадь пластин 10^{-2} м^2 . Определите заряды на каждой из пластин, если конденсатор замкнуть проводником накоротко.

1.5.33. Кольцо радиусом 10 см, выполненное из тонкой проволоки, равномерно заряжено с линейной плотностью 14 нКл/м . Определите напряженность поля на оси, проходящей через центр кольца, в точке, удаленной на расстоянии 20 см от центра кольца.

1.5.34. Плоский конденсатор, длина пластин которого много больше расстояния между ними, присоединен к источнику постоянного напряжения. Докажите, что напряженность электрического поля внутри конденсатора не изменится, если пространство между обкладками заполнить диэлектриком.

1.5.35. Плоский конденсатор состоит из двух пластин, разделенных стеклом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 7$. Определите давление пластин на стекло перед пробоем, если напряженность электрического поля в этом случае $E = 50 \cdot 10^6 \text{ В/м}$?

Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема Гаусса

1.5.36. Используя теорему Остроградского-Гаусса, определите напряженность электрического поля внутри и вне заряженной сферы, если ее заряд q .

1.5.37. Используя теорему Остроградского-Гаусса, определите напряженность электрического поля внутри и вне равномерно заряженного бесконечного цилиндра с объемной плотностью заряда ρ . Постройте график зависимости напряженности поля от расстояния до оси цилиндра.

1.5.38. Определите поток вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую шаровую поверхность, внутри которой находятся три точечных заряда $+2 \text{ нКл}$, $+5 \text{ нКл}$ и -3 нКл . Рассмотрите случаи, когда заряды находятся в вакууме и в воде ($\varepsilon = 81$)

1.5.39. Плоская прямоугольная площадка со сторонами $a = 5 \text{ см}$ и $b = 8 \text{ см}$ находится в электрическом поле точечного заряда $q = 0,5 \text{ мКл}$. Расстояние от точечного заряда до площадки много больше размеров площадки. Определите поток вектора напряженности электростатического поля через эту площадку.

1.5.40. Электрическое поле создано прямым бесконечным проводом, равномерно заряженным с линейной плотностью $\tau = 0,2 \text{ мКл/м}$. Определите поток вектора напряженности поля через прямоугольную площадку со сторонами $a = 10 \text{ см}$ и $b = 30 \text{ см}$, две большие стороны, которой параллельны проводу и одинаково удалены от него на расстоянии 15 см .

1.5.41. Поток вектора напряженности электрического поля через плоскую поверхность пластины, равномерно заряженную с поверхностной плотностью заряда σ , равен Φ_E . Определите силу, действующую на пластину в направлении, перпендикулярном ее плоскости.

1.5.42. Заряды равномерно распределены с объемной плотностью 5 нКл/м^3 по шару, радиусом 10 см , выполненного из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью 6 . Определите, пользуясь теоремой Остроградского-

Гаусса, напряженность электростатического поля на расстояниях 5 см и 15 см от центра шара.

1.5.43. Пространство между двумя концентрическими сферами, радиусы которых $R_1 = 10 \text{ см}$, $R_2 = 20 \text{ см}$, заряжено с объемной плотностью $\rho = \frac{b}{r^2}$, где $b = 1 \text{ нКл/м}$, r – расстояние от центра сфер. Определить напряженность электрического поля как функцию расстояния от центра сферы. Постройте график полученной зависимости.

1.5.44. Некоторая система имеет электрический заряд, распределенный с объемной плотностью $\rho = \rho_0 e^{-\alpha r^3}$, где $\rho_0 = 1 \text{ нКл/м}^3$, $\alpha = 10 \text{ м}^{-3}$, r – расстояние от центра данной системы. Определите напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $R = 1 \text{ м}$ от центра. Постройте график зависимости напряженности электрического поля от расстояния до центра системы.

1.5.45. Тонкая пластина равномерно заряжена с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 1 \text{ нКл/м}^2$. Среда вблизи пластины имеет заряд противоположного знака с объемной плотностью, зависящей от расстояния x до пластины по закону $\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{|x|}{d}\right)$, где $\rho_0 = -10 \text{ нКл/м}^3$, $d = 10 \text{ см}$. Определите, на каком расстоянии от пластины напряженность электрического поля равна нулю?

1.5.46. Согласно выводам квантовой механики при локализации электрона внутри сферы радиусом $R = 1 \text{ \AA}$, его электрический заряд можно считать распределенным по объему с плотностью $\rho = \frac{-e}{2\pi R r} \sin^2\left(\frac{\pi r}{R}\right)$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, r – расстояние от центра сферы. Определите напряженность электрического поля на расстоянии $r = R/2$ от центра сферы. Постройте график зависимости напряженности электрического поля от расстояния до центра сферы.

Работа сил электрического поля Энергия электрического поля. Потенциал. Циркуляция вектора напряженности поля

1.5.47. Определите потенциал в точке А, лежащей на продолжении оси диполя и отстоящей на расстоянии $R \gg L$, если L – плечо диполя.

1.5.48. Два проводящих шара различных диаметров приводят в соприкосновение и заряжают. Затем их отводят на значительное расстояние. Одинаковыми ли будут у них потенциалы?

1.5.49. Заряд величиной $0,2 \text{ Кл}$ удален от заряда $0,6 \text{ Кл}$ на расстояние 25 м . Определите потенциал поля в точке, находящейся на середине отрезка, соединяющего заряды.

1.5.50. Заряды по 10^{-6} Кл каждый находятся в углах квадрата со стороной 20 см . Определите разность потенциалов в поле этих зарядов между центром квадрата и серединой одной из его сторон.

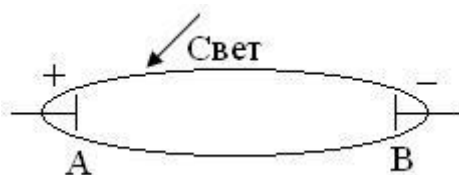
1.5.51. Точечный заряд 10 нКл находится в спирте, диэлектрическая проницаемость которого равняется 25 . Определите потенциал в точке, отстоящей на 10 см от заряда.

1.5.52. Определите разность потенциалов между вершиной и основанием Эйфелевой башни высотой 350 м , образующейся из-за вращения Земли. Широта Парижа 45° .

1.5.53. Найдите потенциал в точке, находящейся на высоте $h/2$ над металлической бесконечной плоскостью, в двух случаях: а) плоскость заряжена с поверхностной плотностью σ , б) плоскость незаряжена, а на высоте h находится точечный заряд $+e$.

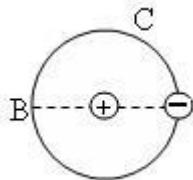
1.5.54. Известно, что электрический заряд Земли составляет около $-6 \cdot 10^5 \text{ Кл}$. Найдите потенциал и градиент потенциала электростатического поля на земной поверхности, приняв радиус Земли $R = 6400 \text{ км}$. Поясните, почему такое поле не опасно для жизни человека.

1.5.55. Под действием света, падающего на электрод A в вакуумной трубке, вылетают электроны с начальной скоростью 200 км/с . Между катодом A и анодом B приложена разность потенциалов 5 В , а расстояние между ними 15 см . Определите расстояние, которое пройдут электроны, от катода A , прежде чем начнут двигаться обратно под действием электрического поля.



1.5.56. Полую металлическому шару радиуса 10 см, который находится в воздухе, сообщен заряд $1,6 \cdot 10^{-9}$ Кл. Определите потенциал: а) внутри шара; б) на поверхности шара; в) на расстоянии 0,5 м от центра шара.

1.5.57. Принимая протон и электрон, из которых состоит атом водорода, за точные заряды, находящиеся на расстоянии $5 \cdot 10^{-9}$ см друг от друга, определите напряженности поля в точках В и С, отстоящих на таком же расстоянии от протона как и электрон.



1.5.58. Электрон, движущийся со скоростью $50 \cdot 10^6$ м/с влетает в пространство между пластинами плоского конденсатора. Расстояние между пластинами 0,3 см, длина 1 см. К конденсатору приложено напряжение 60 В. На сколько увеличится скорость электрона на выходе из конденсатора по сравнению с начальной скоростью?

1.5.59. Электрон движется по направлению силовых линий однородного электрического поля с напряжённостью 160 В/м. Какое расстояние он пролетит в вакууме до остановки, имея начальную скорость 800 км/с.

1.5.60. Две альфа - частицы летят из бесконечности навстречу друг другу со скоростями V_1 и V_2 . На какое минимальное расстояние они смогут сблизиться и как будут после этого двигаться?

1.5.61. Электрон движется по направлению силовых линий однородного электрического поля, напряжённостью 120 В/м. Определите расстояние и время движения электрона до его полной остановки, если его начальная скорость составляла 1000 км/с.

1.5.62. Какую работу нужно совершить, чтобы ионизировать атом водорода? Диаметр атома 10^{-8} см, заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

1.5.63. Большая тонкая проводящая пластинка площади S и толщиной d помещена в однородное электрическое поле напряжённости E , перпендикулярное пластине. Определите количество тепла, выделившееся в пластине, если поле мгновенно выключить?

1.5.64. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора 3000 В. Пространство между пластинами заполнено парафином толщиной

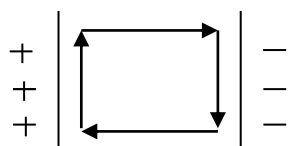
5 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$. Определите напряжённость поля в парафине, диэлектрическую восприимчивость парафина и плотность связанных зарядов на его поверхности.

1.5.65. Поле создано двумя равномерно заряженными концентрическими сферами, радиусами 5 см и 8 см, и зарядами 2 нКл и -1 нКл соответственно. Определите напряжённость и потенциал электрического поля в точках, лежащих от центра сфер на расстояниях 3 см, 6 см, 10 см. Постройте график зависимости $E = f(r)$.

1.5.66. Градиент потенциала электрического поля плоского конденсатора 800 кВ/м. Определите плотность заряда на пластинах, если диэлектрическая проницаемость среды равняется 10.

1.5.67. На поверхности двух концентрических сфер радиусами 2 см и 5 см равномерно распределён заряд с поверхностной плотностью σ . Определите его величину, если для переноса из бесконечности в общий центр сфер 1 мКл требуется 10^{-4} Дж энергии.

1.5.68. Напряжённость электрического поля внутри конденсатора равна E . определите работу перемещения заряда q по замкнутому прямоугольному контуру.



1.5.69. На расстоянии $r_1 = 4$ см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд $2 \cdot 10^{-6}$ Кл. Под действием поля заряд перемещается по силовой линии в точку находящуюся на расстоянии $r_2 = 1$ см от нити. При этом совершается работа 0,5 Дж. Определите линейную плотность заряда нити.

1.5.70. Около заряженной бесконечно протяженной плоскости находится точечный заряд $2 \cdot 10^{-6}$ Кл. Под действием поля заряд перемещается по силовой линии в точку, находящуюся на расстояние 2 см от плоскости. При этом совершается работа 0,5 Дж. Определите поверхностную плотность заряда плоскости.

1.5.71. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины до другой, приобретает скорость 10^8 см/с. Расстояние между пластинами 5,3 мм. Определите: 1) разность потенциалов между пластинами;

2) напряженность электрического поля конденсатора; 3) поверхностную плотность заряда на пластинах.

1.5.72. Электростатическое поле создается бесконечным цилиндром, радиусом 8 мм, равномерно заряженным с линейной плотностью 10 нКл/м . Определите разность потенциалов между двумя точками поля, лежащими на расстояниях 2 мм и 7 мм от поверхности цилиндра.

1.5.73. Электростатическое поле создается шаром, радиусом 10 см, равномерно заряженным с объемной плотностью 20 нКл/м^3 . Определите разность потенциалов между точками, лежащими внутри шара на расстояниях 2 см, 8 см от его центра.

Емкость. Конденсаторы. Соединения конденсаторов.

1.5.74. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора 280 В. Поверхностная плотность заряда на пластинах $4,95 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/см}^2$. Площадь каждой пластины 100 см^2 . Найдите: 1) напряженность поля внутри конденсатора; 2) расстояние между пластинами; 3) скорость, которую получит электрон, пройдя в конденсаторе путь от одной пластины до другой.

1.5.75. Электрон влетает в плоский конденсатор, находясь на одинаковом расстоянии от каждой пластины и имея скорость 60000 км/с , направленную параллельно пластинам. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к пластинам, чтобы электрон не вылетел из конденсатора, если расстояние между пластинами 2 см и длина пластин 10 см? Электрон нерелятивистский.

1.5.76. Плоский воздушный конденсатор, расстояние между пластинами которого 2 см, заряжен до разности потенциалов 3000 В. Какова будет напряженность поля конденсатора, если, не отключая его от источника напряжения, пластины раздвинуть до расстояния в 5 см? Вычислите энергию конденсатора до и после раздвижения пластин. Площадь каждой пластины 100 см^2 .

1.5.77. Шар, погруженный в масло с диэлектрической проницаемостью среды $\epsilon=4$, имеет потенциал 4500 В и поверхностную плотность заряда $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$. Найдите радиус, заряд, ёмкость и энергию шара.

1.5.78. Напряжение на четырёх конденсаторах соединённых параллельно, равно 200 В. Определите энергию, которая выделится при разряде этой батареи, если ёмкость каждого конденсатора 2 мкФ.

1.5.79. Площадь пластин плоского воздушного конденсатора 100 см² и расстояние между ними 5 мм. Определите разность потенциалов, которая была приложена к пластинам конденсатора, если известно, что при разряде конденсатора выделилось $4,19 \cdot 10^{-3}$ Дж тепла.

1.5.80. Найдите объёмную плотность энергии электрического поля в точке, находящейся на расстоянии 2 см от поверхности заряженного шара радиусом в 1 см. Поверхностная плотность заряда на шаре $5 \cdot 10^{-6}$ Кл/м², диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 2$. Вычислите ёмкость и полную энергию шара.

1.5.81. Плоский конденсатор, состоящий из двух пластин, имеет изолирующий слой толщиной 0,2 мм. Определите плотность связанных зарядов на поверхности изолирующего слоя, если конденсатор заряжен до 600 В, а диэлектрическая восприимчивость изолирующего слоя равна 0,5.

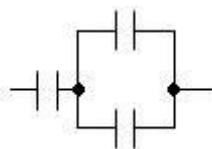
1.5.82. Первоначально плоский воздушный конденсатор с зазором между обкладками в 1 см был заряжен до 300 В. Затем, отключив конденсатор от источника, в него внесли пластину с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5$ и толщиной в половину зазора. Найдите напряженность электростатического поля в обоих случаях.

1.5.83. Плоский конденсатор заряжен до 120 В. Определите диэлектрическую проницаемость изолирующего слоя, если площадь одной пластины 60 см², заряд на ней 10^{-8} Кл, а расстояние между пластинами 6 мм. Определите силу взаимодействия пластин.

1.5.84. Сплошной эбонитовый шар, диэлектрическая проницаемость которого равна 3 и радиус 5 см, заряжен равномерно с объёмной плотностью 10 нКл/м³. Определите энергию электростатического поля, заключённую в шаре.

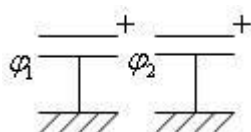
1.5.85. Батарея из шести последовательно соединённых лейденских банок, каждая ёмкостью $4 \cdot 10^{-10}$ Ф, питается напряжением 80 кВ. Одна из банок пробивается. Определите изменение энергии батареи банок.

1.5.86. Вычислите электроёмкость системы конденсаторов, представленной на рисунке, если ёмкость каждого конденсатора 0,9 мкФ.

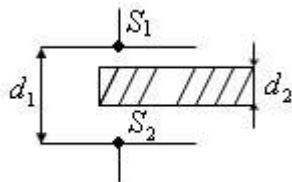


1.5.87. Несколько (N) одинаковых конденсаторов соединили параллельно и зарядили до разности потенциалов φ_0 . Затем с помощью переключателя их соединили последовательно. Определите разность потенциалов между крайними клеммами. Изменится ли энергия системы?

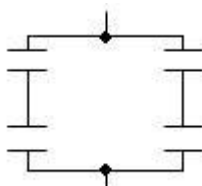
1.5.88. Два одинаковых конденсатора заряжены до разных потенциалов φ_1 и φ_2 относительно заземлённых отрицательных электродов. Затем конденсаторы соединили параллельно. Определите их потенциал после соединения и изменение энергии системы.



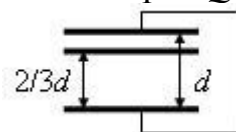
1.5.89. В пространство между пластинами плоского воздушного конденсатора помещён стеклянный конденсатор с большой площадью пластин. Определите ёмкость такой системы, если: площадь пластины $S_1=300 \text{ см}^2$, $S_2=600 \text{ см}^2$, $d_1=4 \text{ мм}$, $d_2=3 \text{ мм}$. Толщиной пластин стеклянного конденсатора пренебречь.



1.5.90. Определите ёмкость батареи конденсаторов, если $C_1=2 \text{ мкФ}$, $C_2=6 \text{ мкФ}$, $C_3=8 \text{ мкФ}$, $C_4=5 \text{ мкФ}$.



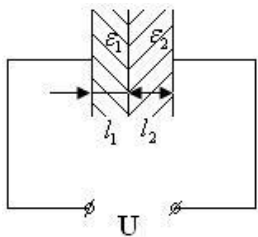
1.5.91. Между соединёнными проводником обкладками конденсатора помещена металлическая пластина. Какой заряд потечёт по проводнику, если внутренней пластине сообщить заряд Q ?



1.5.92. Система состоит из двух шаров радиусами r , находящихся в среде с диэлектрической проницаемостью ε . Найдите ёмкость системы, считая, что расстояние между центрами шаров $R \gg r$. Заряды по поверхности шаров распределены равномерно.

1.5.93. К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов 600 В. Площадь пластин 200 см^2 , расстояние между ними 1,2 мм. Пластины раздвинули до 12 мм. Определите энергию конденсатора до и после раздвижения пластин, если источник напряжения перед движением: 1) отключался, 2) не отключался.

1.5.94. Плоский конденсатор, площадь каждой пластины которого $S = 400 \text{ см}^2$, заполнены двумя слоями диэлектрика. Граница между параллельна обкладкам. Первый слой – пластик ($\varepsilon_1 = 2$) толщины $l_1 = 0,2 \text{ см}$, второй стекло ($\varepsilon_2 = 7$) толщины $l_2 = 0,3 \text{ см}$. Конденсатор заряжен до разности потенциалов $U = 600 \text{ В}$. Определите энергию конденсатора.



1.5.95. Протон и альфа – частица, двигаясь с одинаковой скоростью, влетают в плоский конденсатор параллельно пластинам. Во сколько раз отклонение протона полем конденсатора от прямолинейной траектории будет больше отклонения альфа – частицы.

1.5.96. К одной из обкладок воздушного конденсатора прилегал стеклянная плоскопараллельная пластина ($\varepsilon = 7$) толщиной $d = 9 \text{ мм}$. После того как конденсатор отключили от источника напряжения 220 В и извлекли стеклянную пластину, между обкладками установилась разность потенциалов 976 В. Определить расстояние между обкладками и приращение энергии электрического поля конденсатора.

1.5.97. Под действием силы притяжения $F = 1 \text{ мН}$ диэлектрик между пластинами конденсатора находится под давлением $P = 1 \text{ Па}$. Определите энергию, объемную плотность энергии электрического поля конденсатора, если расстояние между пластинами 1 мм.

1.5.98. Плоский воздушный конденсатор площадь пластин которого $S = 200 \text{ см}^2$, расстояние между пластинами $l_1 = 0,3 \text{ см}$ заряжен до разности

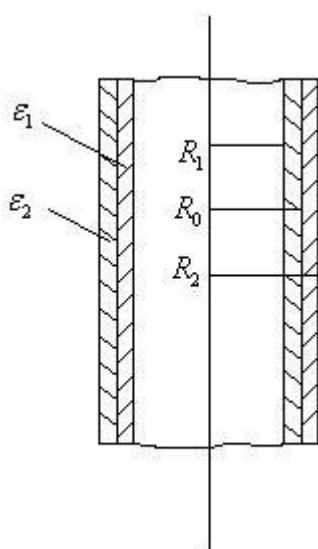
потенциалов $U_0 = 600 \text{ В}$. Определите работу, которую надо совершить, чтобы увеличить расстояние между пластинами до $l_2 = 0,5 \text{ см}$, не отключая конденсатор от источника.

1.5.99. Импульсную стыковую сварку медной проволоки осуществляют с помощью разряда конденсатора емкостью $C = 1000 \text{ мкФ}$ при напряжении на конденсаторе $U = 1500 \text{ В}$. Определите среднюю полезную мощность разряда импульса, если его время $\tau = 2 \text{ мкс}$ и КПД установки 4%.

1.5.100. Определите энергию электрического поля, созданного зарядом q , равномерно распределенным в вакууме по объему, имеющему форму шара радиуса R .

1.5.101. Воздушный конденсатор емкостью $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$ заряжен до разности потенциалов $U_0 = 600 \text{ В}$. Определите изменение энергии электрического поля конденсатора и работу сил поля при заполнении конденсатора диэлектриком ($\varepsilon = 2$) для двух случаев: 1) конденсатор отключен от источника, 2) конденсатор подключен к источнику.

1.5.102. В пространстве, наполовину заполненном парафином, ($\varepsilon = 2$), создано однородное электрическое поле, напряженность которого $E_1 = 2 \text{ В/м}$. Вектор $\vec{E}$ образует угол $\alpha = 60^\circ$ с границей раздела, парафин-воздух. Определите величину вектора электрического смещения и поляризации в парафине.



1.5.103. Цилиндрический конденсатор, радиусы обкладок которого $R_1 = 2,0 \text{ см}$ и $R_2 = 2,5 \text{ см}$, заполнен двумя коаксиальными слоями диэлектрика: бумага ($\varepsilon_1 = 4$), стекло ($\varepsilon_2 = 7$). Радиус границы раздела диэлектрика $R_0 = 2,3 \text{ см}$. При какой разности потенциалов между обкладками начнется пробой диэлектрика? Предельные напряженности, которые может выдержать конденсатор: $E_1 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ кВ/м}$; $E_2 = 1,0 \cdot 10^4 \text{ кВ/м}$.

1.6. Вопросы

1. Электрические заряды. Элементарный заряд. Электрическое поле.

2. Закон Кулона для точечных зарядов в векторной и скалярной формах.
3. Напряженность электрического поля – силовая характеристика поля. Линии напряженности поля.
4. Принцип суперпозиции полей.
5. Расчет электрических полей на основе принципа суперпозиции:
 - поле электрического диполя;
 - поле на оси равномерно заряженного проволочного кольца;
6. Понятие потока вектора напряженности электрического поля.
7. Теорема Гаусса.
8. Расчет электрических полей на основе теоремы Гаусса:
 - поле равномерно заряженной непроводящей сферы;
 - поле бесконечной, равномерно заряженной плоскости;
 - поле двух параллельных бесконечных, равномерно заряженных плоскостей;
 - поле бесконечной, равномерно заряженной прямой нити.
9. Работа сил электрического поля. Потенциальность электрического поля.
10. Циркуляция вектора напряженности электрического поля.
11. Потенциальная энергия пробного заряда, внесенного в электрическое поле. Потенциал электрического поля. Поверхности равного потенциала и их свойства.
12. Связь между напряженностью и потенциалом электрического поля. Градиент потенциала, его направление и физический смысл.
13. Расчет потенциала и разности потенциалов в электрическом поле
 - потенциал поля электрического диполя;
 - потенциал поля равномерно заряженного кольца, на оси кольца;
 - разность потенциалов между двумя равномерно заряженными бесконечными плоскостями.
14. Диэлектрики. Полярные и неполярные молекулы. Поляризуемость молекулы, ее электрический дипольный момент.
15. Действие однородного и неоднородного электрических полей на полярные молекулы. Потенциальная энергия диполя.
16. Поляризация диэлектриков. Вектор поляризации. Диэлектрическая восприимчивость. Связь вектора поляризации с поверхностной плотностью связанных зарядов.
17. Расчет электрического поля в диэлектриках. Относительная диэлектрическая проницаемость и ее физический смысл.
18. Индукция электрического поля, линии индукции.
19. Емкость. Единицы измерения емкости.
20. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора. Соединения конденсаторов.

21. Энергия системы точечных зарядов. Собственная энергия конденсатора. Объемная плотность энергии электрического поля.

2. Постоянный электрический ток

2.1. Основные понятия и закономерности

Электрический ток – направленное движение заряженных частиц.

- Сила тока – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника за единицу времени

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}.$$

Постоянный ток – ток, сила и направление которого не изменяются со временем: $I = \text{const}$.

Переменный ток – ток, сила и направление которого изменяется со временем.

- Плотность тока $\vec{j}$ – вектор, численно равный модулю тока, проникающего через единичную площадку, перпендикулярную напряженности поля:

$$j_n = \frac{dI}{dS}.$$

- Сторонние силы – силы, разделяющие заряды в электрической цепи и создающие в ней электростатическое поле.
- Источники тока (энергии, напряжения) – устройства, в которых действуют сторонние силы
- Электродвижущая сила (ЭДС) – характеризует работу сторонних сил по перемещению заряда по замкнутому контуру:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

- Закон Ома для однородного участка цепи

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

- Сопротивление проводника длиной l , сечением S

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad R = R_0(1 + \alpha t),$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника, l, S – длина и площадь поперечного сечения проводника, R_0 – сопротивление при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления.

- Сопротивление проводников, при последовательно и параллельном соединении:

$$R_{\text{осл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i,$$

$$\frac{1}{R_{\text{парал}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

сопротивление n одинаковых параллельно соединенных проводников.

$$R_{\text{парал}} = \frac{R}{n}.$$

- Закон Ома для неоднородного участка цепи (1-2)

$$I R_{21} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{21}, \text{ или } U_{21} = I R_{21},$$

где U_{21} – напряжение на неоднородном участке цепи.

- Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока.

- Работа тока – мера превращения энергии электрического тока в другие виды энергии

$$A = q \cdot U = (I \cdot t) U = I \cdot U \cdot t.$$

- Закон Джоуля-Ленца определяет энергию Q , выделяющуюся в проводнике в форме теплоты, при прохождении тока I :

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = I U t.$$

- Мощность тока:

$$P = I U = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

- Закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E},$$

где $\sigma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость материала проводника.

- Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

$$\omega = \sigma E^2,$$

плотность тепловой мощности тока в каждой точке проводника пропорциональна квадрату напряженности поля.

- Плотность тока из классических представлений

$$\vec{j} = ne\langle\vec{v}\rangle,$$

где n – концентрация носителей заряда (электронов), $\langle\vec{v}\rangle$ – среднее значение дрейфовой скорости носителей заряда.

2.2. Обозначения физических величин и единицы измерения.

I – сила тока (ток), А.

q – электрический заряд, Кл.

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, Кл.

j – плотность тока, А/м².

dS – элемент поверхности, м².

ε – ЭДС источника тока, В.

A_{cm} – работа сторонних сил, Дж.

R – сопротивление участка проводника проводника, Ом.

r – внутреннее сопротивление источника тока, Ом.

l – длина участка проводника, м.

ρ_0 – удельное сопротивление при 0°С, Ом·м.

U – напряжение, В.

A – работа тока, Дж.

Q – количество тепла, Дж.

P – мощность тока, Вт.

2.3. Примеры решения задач

1. Определите суммарный импульс электронов в прямолинейном проводнике, длиной $l = 10$ км, если по нему течет ток $I = 400$ А.

Дано:

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $l = 10^4$ м, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $I = 400$ А.

р – ?

Решение:

Ток в металлах – это направленное движение свободных электронов, которое характеризуется определенным импульсом $p = \sum_{i=1}^n m v_i = N \cdot m \langle v \rangle$, где N – число свободных электронов массой m в проводнике, $\langle v \rangle$ – средняя скорость их направленного движения.

Плотность тока с одной стороны $j = \frac{I}{S}$, а с другой $j = ne \langle v \rangle$, приравняем правые части и выразим среднюю скорость: $\langle v \rangle = \frac{I}{neS}$. Подставим

полученное выражение в формулу для импульса: $p = \frac{mNI}{enS} = \frac{mI}{eS} V = \frac{mI \ell}{e}$,

$V = \frac{N}{n}$, n – концентрация электронов (учли, что объем $V = l \cdot S$).

Размерность: $[p] = 1 \left[\frac{\text{Кг} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \right] = 1 \left[\frac{\text{Кг} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} \right] = 1 \left[\text{Кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$.

Вычисление: $p = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 400}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,3 \cdot 10^{-5} (\text{Кг} \cdot \text{м} / \text{с})$.

Ответ: импульс электронов в проводнике $p = 2,3 \cdot 10^{-5} (\text{Кг} \cdot \text{м} / \text{с})$.

2. Напряжение на концах проводника сопротивлением 5 Ом за 0,5 с равномерно возрастает от 0 до 20 В. Определите заряд, проходящий через проводник за это время.

Дано:

$R = 5 \text{ Ом}$, $t = 0,5 \text{ с}$, $U_1 = 0$, $U_2 = 20 \text{ В}$.

$q = ?$

Решение:

За промежуток времени dt по проводнику переносится заряд $dq = I dt$. Ток

$$I = \frac{U(t)}{R}.$$

Учтем, что напряжение изменяется линейно со временем: $U(t) = kt$, где

$$k = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{U_2 - U_1}{\Delta t}, \quad k = \frac{20 - 0}{0,5} = 40 \left(\frac{\text{В}}{\text{с}} \right).$$

Заряд, переносимый по проводнику за 0,5 (с):

$$q = \int_0^t dq = \int_0^{0,5} I dt = \int_0^{0,5} \frac{U(t)}{R} dt = \frac{k}{R} \int_0^{0,5} t dt = \frac{k}{R} \frac{t^2}{2} \Big|_0^{0,5} = \frac{40 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 5} = 1 (\text{Кл}).$$

Ответ: переносимый по проводнику $q = 1 (\text{Кл})$.

3. Температура вольфрамовой нити электролампы 2000°C , диаметр $0,02$ мм, сила тока в ней 4 А. Определите напряженность электрического поля в нити.

Дано:

$$I = 4 \text{ А}, t = 2000^{\circ}\text{C}, d = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \rho_0 = 5,5 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \alpha = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$E - ?$

Решение:

Плотность тока по определению $j = \frac{I}{S}$, $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения нити.

По закону Ома в дифференциальной форме $j = \sigma E = \frac{E}{\rho}$, где ρ – удельное сопротивление материала проводника, $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, тогда $j = \frac{E}{\rho}$,

$$E = j\rho = \frac{I}{S} \rho_0(1 + \alpha t), \quad E = \frac{4I\rho_0(1 + \alpha t)}{\pi d^2}.$$

$$\text{Размерность: } [E] = 1 \left[\frac{\text{А} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} \right] = 1 \left[\frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{м} \cdot \text{А}} \right] = 1 \left[\frac{\text{В}}{\text{м}} \right].$$

$$\text{Вычисление: } E = \frac{4 \cdot 5,5 \cdot 10^{-8} (1 + 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3)}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-10}} = 8000 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

$$\text{Ответ: } E = 8000 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

4. Определите ЭДС аккумуляторной батареи, если ток короткого замыкания в ней 10 А, и при подключении к ней резистора сопротивлением 9 Ом сила тока в цепи равна 1 А.

Дано:

$$I_{\text{кз}} = 10 \text{ А}, R = 9 \text{ Ом}, I = 1 \text{ А}.$$

$\mathcal{E} - ?$

Решение:

Запишем формулу закона Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Ток короткого замыкания получается, если $R = 0$, $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r} \Rightarrow r = \frac{\mathcal{E}}{I_{\text{кз}}}$, тогда

$$\mathcal{E} = \frac{IR}{1 - I/I_{\text{кз}}};$$

Вычисление: $\varepsilon = \frac{9 \cdot 1}{1 - 0,1} = 10(B)$.

Ответ: ЭДС батареи $\varepsilon = 10(B)$.

5. В проводнике из материала плотности D и атомной массы A создано электрическое поле напряженностью E . Считая, что на каждый атом приходится один электрон проводимости и в единичном объеме проводника выделяется за 1 с тепловая энергия P , определите время между соударениями электронов с ионами решетки. Удары неупругие.

Дано:

$D, A, E, N, e, m_0, N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-3}$.

$t - ?$

Решение:

Плотность тепловой мощности ω связана с напряженностью поля и плотностью тока – законом Джоуля-Ленца в дифференциальном виде:

$\omega = jE = P$, а $j = ne\langle v \rangle = \sigma E$ – плотность тока, где $n = \frac{N}{V}$, N – число электронов, n – число электронов в единице объема.

Определим N , используя определение количества вещества $\frac{N}{N_A} = \frac{m}{\mu}$,

$N = \frac{N_A m}{\mu}$, где $\mu = A$ – атомная масса материала, N_A – постоянная Авогадро.

Под действием электрического поля электрон в проводнике движется ускоренно $F_{кл} = m_0 a = eE \Rightarrow a = \frac{eE}{m_0}$, где m_0 – масса электрона.

Объем проводника $V = \frac{m}{D}$ и $n = \frac{N_A m}{\mu m} D = \frac{DN_A}{\mu}$, m – масса проводника.

Удар электрона с решеткой неупругий, т.е. он передает решетке свою энергию и разгоняется от скорости $v_0 = 0$, до скорости $v = at$. Его средняя скорость: $\langle v \rangle = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{at}{2} = \frac{eEt}{2}$.

Следовательно, плотность тока будет равна: $j = \frac{DN_A}{\mu} e^2 \frac{Et}{2m_0}$. Из

полученного выражения выразим время столкновения $t = \frac{2\mu m_0 j}{DN_A e^2 E}$.

Учтем, что плотность тока $j = \frac{\omega}{E} = \frac{N}{E}$, тогда получим: $t = \frac{2Am_0 N}{DN_A e^2 E^2}$.

Проверка

размерности:

$$[t] = 1 \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{моль} \cdot \text{м}^2}{\text{моль} \cdot \text{Кл}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{В}^2 \cdot \text{кг}} \right] = 1 \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{Кл}^2 \cdot \text{В}^2} \right] = 1 \left[\frac{\text{с}^6}{\text{с}^5} \right] = 1[\text{с}].$$

Ответ: время между ударами электронов с ионами: $t = \frac{2Am_0N}{DN_A e^2 E^2}$.

6. Считая свободные электроны металла идеальным газом, определите коэффициент теплопроводности серебра при температуре 300 К. Удельное сопротивление серебра при данной температуре $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Дано:

$$T = 300 \text{ К}, \quad \rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}, \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

$\chi - ?$

Решение:

Используем закон Видемана–Франца, согласно которому отношение коэффициента теплопроводности χ к коэффициенту электропроводности

σ при данной температуре одинаково для всех металлов: $\frac{\chi}{\sigma} = CT = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2 T$,

где C – константа, одинаковая для всех металлов и равная (по электронной теории проводимости металлов), $C = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2$.

Коэффициент удельной электропроводности связан с удельным сопротивлением металла $\sigma = \frac{1}{\rho}$.

Выразим коэффициент теплопроводности: $\chi = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2 T \sigma = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2 \frac{T}{\rho}$.

Проверка размерности: $[\chi] = 1 \left[\frac{\text{Дж}^2 \text{К}}{\text{К}^2 \text{Кл}^2 \text{Ом} \cdot \text{м}} \right] = 1 \left[\frac{A \cdot B \cdot c \cdot Bm \cdot c \cdot A}{K \cdot A \cdot c \cdot B \cdot m} \right] = 1 \left[\frac{Bm}{K \cdot m} \right]$.

Вычисления: $\chi = 3 \left(\frac{1,38 \cdot 10^{-23}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \right)^2 \frac{300}{1,7 \cdot 10^{-8}} = 3 \cdot (0,86)^2 \cdot 10^{-8} \frac{300}{1,7 \cdot 10^{-8}} = 391,6 \left(\frac{Bm}{K \cdot m} \right)$.

Ответ: коэффициент теплопроводности серебра $\chi = 391,6 \frac{Bm}{K \cdot m}$.

7. Если к аккумулятору подключить последовательно амперметр и вольтметр, то они покажут 0,2 А и 16 В. Если приборы соединить параллельно и подключить к источнику, они покажут 1,2 А и 2 В. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление аккумулятора.

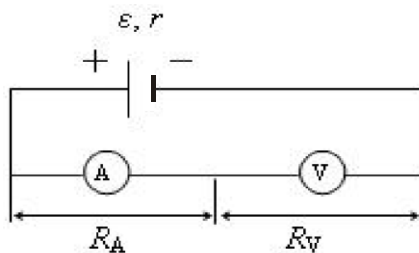
Дано:

$$I_1 = 0,2 \text{ A}, U_1 = 16 \text{ В},$$

$$I_2 = 1,2 \text{ A}, U_2 = 2 \text{ В}.$$

$$\varepsilon = ? \quad r = ?$$

Решение:



1. Последовательное соединение амперметра и вольтметра. По закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_V} \Rightarrow R_V = \frac{U_1}{I_1}, \quad R_V = \frac{16}{0,2} = 80 (\text{Ом}).$$

2. Параллельное соединение приборов

$$\text{Ток через вольтметр } I_2 = \frac{U_2}{R_A}$$

$$\text{Сопротивление амперметра } R_A = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2}{1,2} = \frac{5}{3} (\text{Ом}).$$

Резльтирующее сопротивление при параллельном включении R_A и R_V :

$$R_{\text{нар}} = \frac{R_A R_V}{R_A + R_V} = \frac{5/3 \cdot 80}{80 + 5/3} = \frac{80}{49} (\text{Ом})$$

3. Запишем формулу закона Ома для полной цепи: $I_1 = \frac{\varepsilon}{R_A + R_V + r}$ – при

последовательном включении; $I_2 = \frac{\varepsilon}{R_{\text{нар}} + r}$ – при параллельном включении.

$$\varepsilon = I_1(R_A + R_V + r) = I_2(R_{\text{нар}} + r) \Rightarrow 1,2(80/49 + r) = 0,2(5/3 + 80 + r).$$

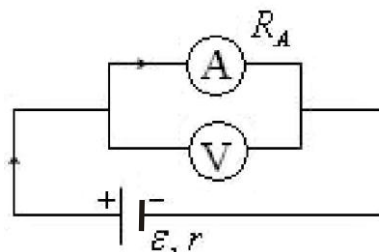
Решением полученного линейного уравнения является:

$$r = 14,07 (\text{Ом}).$$

ЭДС источника $\varepsilon = 0,2(5/3 + 80 + 14,07) = 0,2 \cdot 95,74 = 19,14 (\text{В}).$

$$\varepsilon = 1,2(80/49 + 14,07) = 1,2 + 15,7 = 19 (\text{В}).$$

Ответ: $\varepsilon = 19 \text{ В}, r = 14 \text{ Ом}.$



8. Три одинаковые батареи присоединяют к сопротивлению $R = 10 \text{ Ом}$, соединив их первый раз параллельно, второй – последовательно друг с другом. Мощность, выделяемая на сопротивление во втором случае, в 4 раза превышает мощность, выделяемую в первом случае. Определите внутреннее сопротивление батареи.

Дано:

$$R = 10 \text{ Ом},$$

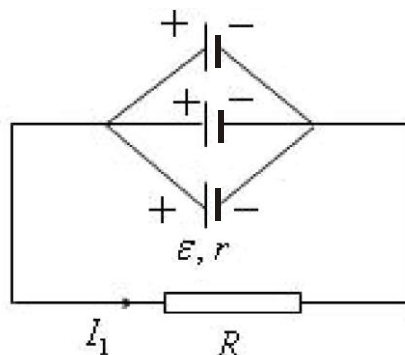
$$n = 26$$

$$P_2/P_1 = 4$$

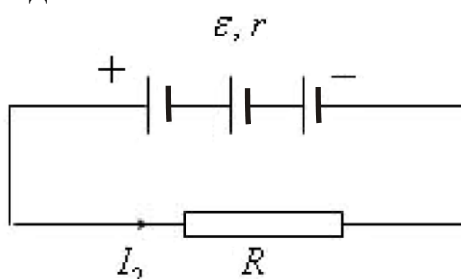
$$r = ?$$

Решение:

1) Параллельное соединение источников



2) Последовательное соединение источников



Запишем закон Ома в случаях 1) и 2)

$$\text{При параллельном: } I_1 = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}} \text{ при последовательном: } I_2 = \frac{n\varepsilon}{R + nr}.$$

Мощность, выделяющаяся на сопротивлении R , определяется законом

$$\text{Джоуля-Ленца: } P_1 = I_1^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + \frac{r}{n})^2}, \quad P_2 = I_2^2 R = \frac{n^2 \varepsilon^2 R}{(R + nr)^2}.$$

Отношение мощностей:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{n^2 \varepsilon^2 R (R + r/n)^2}{(R + nr)^2 \varepsilon^2 R} = \frac{n^2 (R + r/n)^2}{(R + nr)^2} = 4,$$

$$n(R + r/n) = 2(R + nr),$$

$$nR + r = 2R + 2nr,$$

$$3R - 2R = 2 \cdot 3r - r = 5r,$$

$$R = 5r \Rightarrow r = \frac{R}{5} = \frac{10}{5} = 2(\text{Ом}).$$

Ответ: внутреннее сопротивление источника $r = 2 \text{ Ом}$.

9. На сколько процентов уменьшается диаметр нити накала лампы из-за испарения, если для поддержания прежней температуры напряжение повысили на 2%? Теплопроводность нити пропорциональна площади ее поверхности.

Дано:

$$\eta = \frac{U - U_0}{U_0} \cdot 100\% = 2\%,$$

$$\eta_d = \frac{d - d_0}{d_0} \cdot 100\% - ?$$

Решение:

Сопротивление проводника

определится формулой $R = \rho \cdot l / S$, где

ρ – удельное сопротивление

проводника, l – его длина,

$S = \pi d^2 / 4$ – площадь поперечного

сечения проводника.

Мощность, выделяющаяся при нагревании проводника:

$$P = U^2 / R = U^2 \pi d^2 / 4 \rho l.$$

По условию теплопроводность пропорциональна площади поверхности нити, т.е. запишем $Q = cS = c\pi dl$ – тепловая энергия, выделяющаяся в единицу времени с единицы поверхности проводника, т.е. $P = Q$, где c – коэффициент пропорциональности. Запишем $U^2 \pi d^2 / 4 \rho l = c\pi dl$, $U^2 d = cl^2 4\rho$.

Для начальных условий $U_0^2 d_0 = cl^2 4\rho$. Приравняем левые части равенств

$$U_0^2 d_0 = U^2 d^2, \quad \frac{d_0}{d} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^2, \quad d_0 = d \left(\frac{U}{U_0}\right)^2, \quad \text{тогда} \quad \eta_d = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{d_0}{d} - 1 = \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 - 1$$

$$\eta_d = \left[\left(\frac{U}{U_0}\right)^2 - 1 \right] \cdot 100\% = \left[\left(\frac{\eta}{100\%} + 1\right)^2 - 1 \right] \cdot 100\% = \left[\left(\frac{\eta}{100\%}\right)^2 + \frac{2\eta}{100\%} + 1 - 1 \right] \cdot 100\%$$

Т.к. $(\eta/100)^2 \ll 100\%$ - можно пренебречь, $\eta_d = 2\eta = 4\%$.

Ответ: диаметр нити накала уменьшится на 4%.

10. Батарея с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 1,2 Ом питает внешнюю цепь, которая состоит из двух параллельно соединенных ламп сопротивлением 4 Ом и 10 Ом. Определите разность потенциалов на зажимах батареи и токи в лампах.

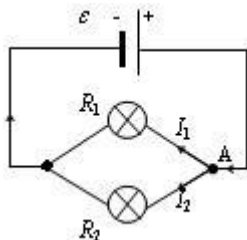
Дано:

$$\varepsilon = 12 \text{ В}, r = 1,2 \text{ Ом}$$

$$R_1 = 4 \text{ Ом}, R_2 = 10 \text{ Ом}$$

$$U - ? \quad I_1 - ? \quad I_2 - ?$$

Решение:



Определим эквивалентное параллельному соединению ламп сопротивление $R_{||} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 2,86 \text{ (Ом)}$

Батарея элементов дает во внешнюю цепь ток, определяемый законом Ома $I = \varepsilon / (R_{\parallel} + r)$; $I = 12 / (2,86 + 1,2) = 2,96 (A)$.

Точка A – узел цепи, в котором сходятся три тока. Применим первый закон Кирхгофа: $I = I_1 + I_2$

Запишем второй закон Кирхгофа для контура AR_1R_2A :

$$I_1 r_1 - I_2 R_2 = 0, I_1 r_1 = I_2 R_2, I_2 = I_1 R_1 / R_2 = 0,4 I_1.$$

$$\text{Для контура } AR_1 \varepsilon A: I_1 r_1 + I r = \varepsilon, I = (\varepsilon - I_1 R_1) / r, I = (12 - 4 I_1) / 1,2 = 10 - (4/1,2) I_1.$$

$$\text{Подставим в формулу тока: } I = I_1 + I_2; 10 - (4/1,2) I_1 = I_1 + 0,4 I_1 = 1,4 I_1$$

$$10 = (1,4 + 3,33) I_1 = 4,73 I_1$$

$$I_1 = 10 / 4,73 = 2,11 (A)$$

$$I_2 = 0,4 \cdot 2,11 = 0,85 (A)$$

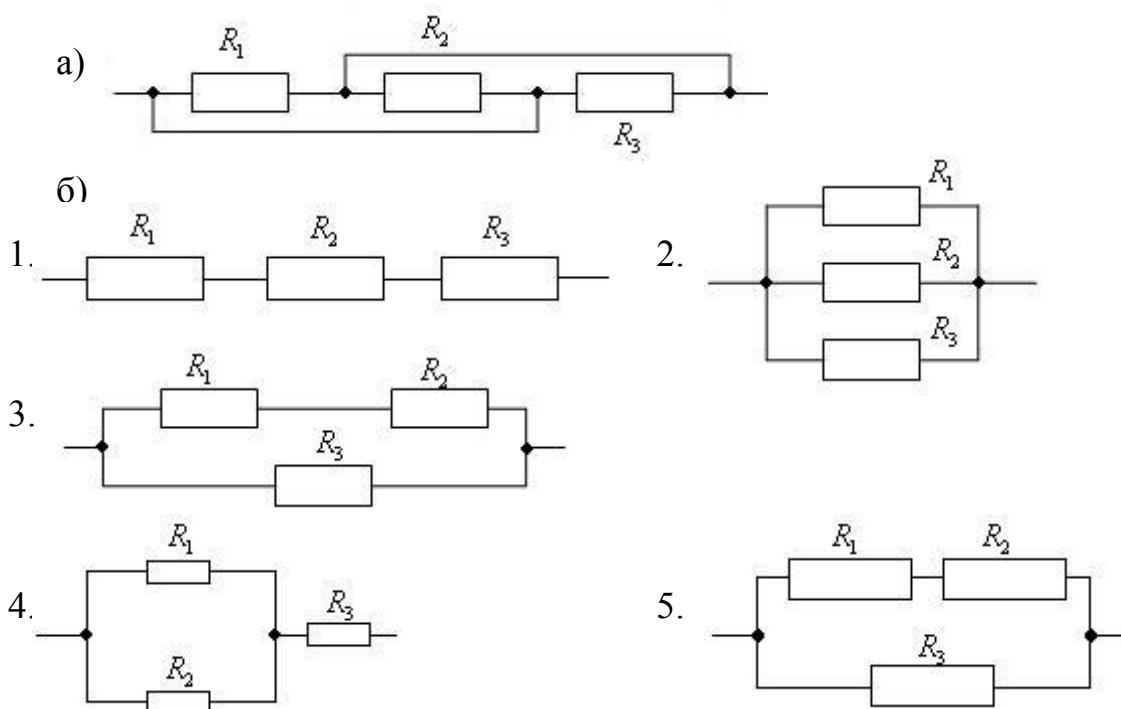
$$I = 2,11 + 0,85 = 2,96 (A)$$

$$\text{Разность потенциалов на зажимах батареи: } U = U_{\parallel} = I R_{\parallel} = 2,96 \cdot 2,86 = 8,47 (B)$$

Ответ: $I_1 = 2,11 A$, $I_2 = 0,85 A$, $I = 2,96 A$.

2.4. Качественные задачи

2.4.1. Три сопротивления соединены так, как показано на рис. (а). Какая из пяти приведенных на рис. (б) схем эквивалентна изображенной на рис. (а).

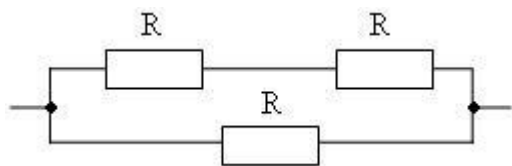


2.4.2. Какой будет электрическая мощность, выделяющаяся указанных соединениях, если к ним подводится одинаковое напряжение U :

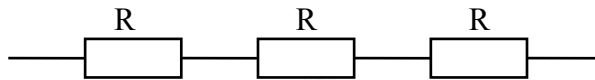
- одинаковой;
- в первом соединении больше, чем во втором и третьем;
- в третьем соединении самая маленькая;

- во втором соединении самая маленькая.

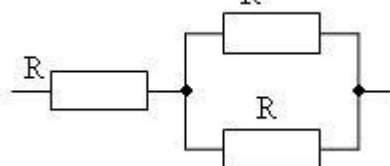
1.



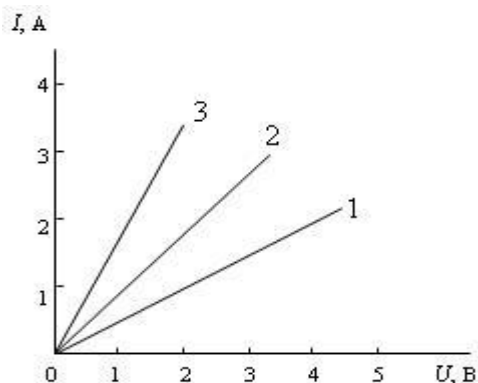
2.



3.



2.4.3. Наибольшее сопротивление проводника, зависимость тока, от напряжения которого представлена на рис.:



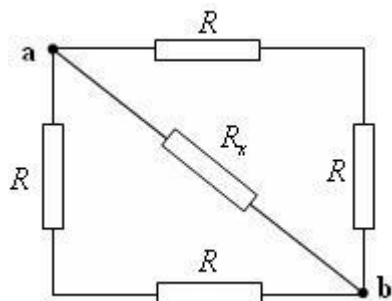
1) у третьего проводника и равно 2 Ом;

2) у второго проводника и равно 1

3) у всех проводников одинаково и равно 1 Ом;

4) у первого проводника и равно 2

2.4.4. Чтобы разность потенциалов между точками диагонали ab была равна нулю, необходимо, чтобы R_x было равно:



1) $1/R$;

2) $2R$;

3) R ;

4) $4R$;

5) $\frac{R^2}{2R} = \frac{R}{2}$;

2.4.5. Собрана схема (рис.1).

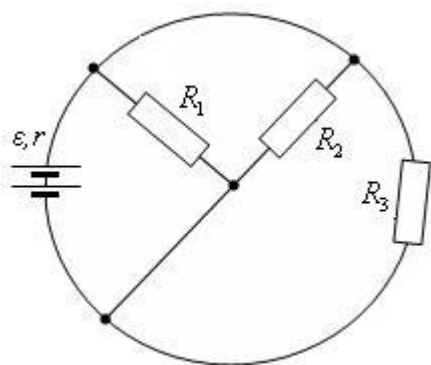
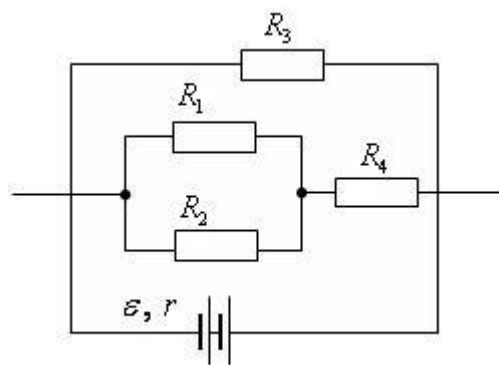
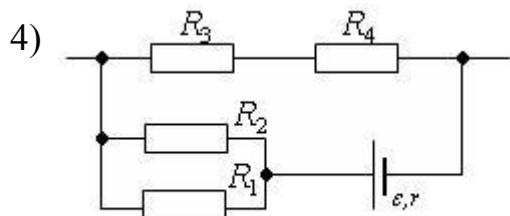
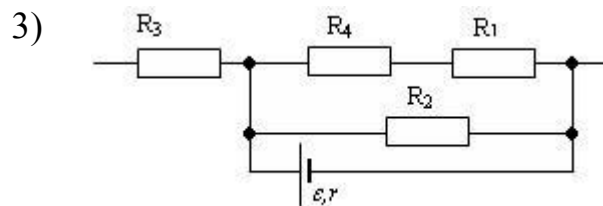
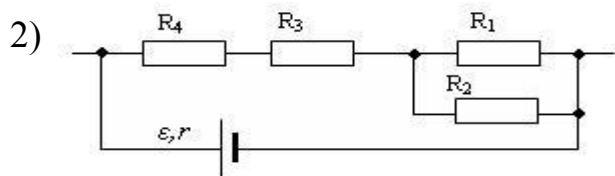


Рис. 1

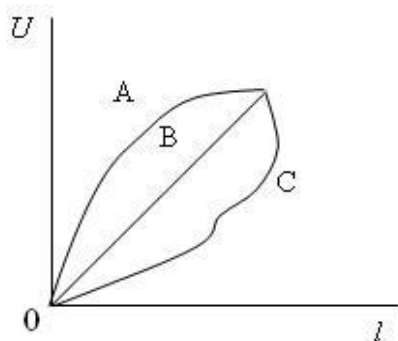
Эквивалентная схема представлена на рис.:

1)

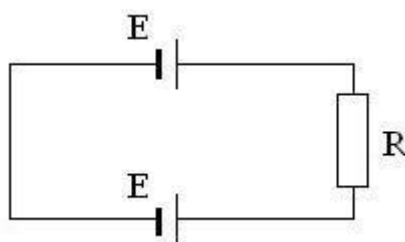




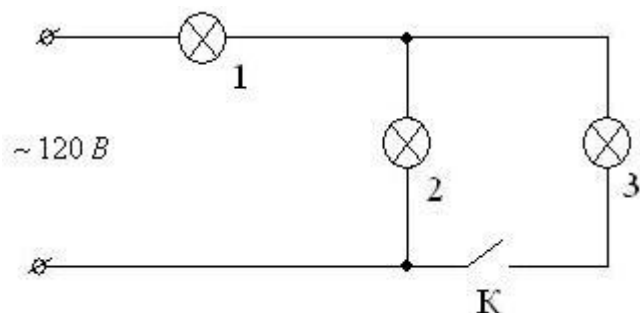
2.4.6. К трем химически однородным проводникам одинакового сопротивления и длины поочередно прикладывают одну и ту же разность потенциалов, и напряжение распределяется, как указано на графике. Изменяется ли по длине поперечное сечение каждого проводника?



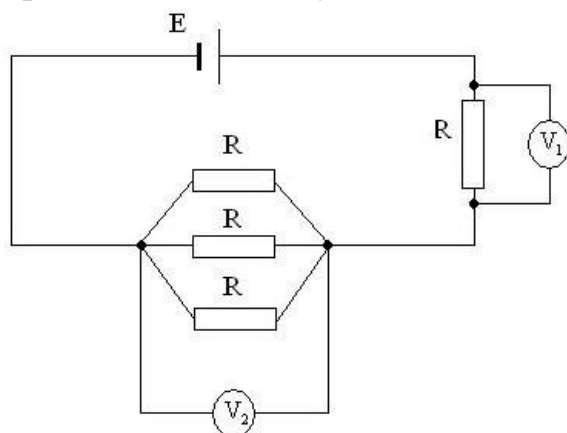
2.4.7. Два элемента одинаковой ЭДС замкнуты на внешнюю цепь. Будет ли в этой цепи протекать ток? Чему равно напряжение на зажимах каждого элемента?



2.4.8. На предложенной схеме все три лампочки одинаковой мощности и рассчитаны на 120 В. Как изменится ток в лампочках 1 и 2, если замкнуть ключ К?



2.4.9. В предложенной цепи все сопротивления одинаковы. Показание, какого вольтметра больше? Почему?



2.4.10. Какой проводник представляет большее сопротивление для постоянного тока: медная сплошная проволока или медная трубка, имеющая внешний диаметр, равный диаметру проволоки?

2.4.11. На чём основано использование в предохранительных пробках свинцовых проводников?

2.4.12. Как можно осветить ёлку лампочками в 6 В, если напряжение в сети 220 В?

2.4.13. Как, имея в распоряжении электрическую плитку на 220 В, проверить исправность лампы на 6 В, используя городскую сеть с напряжением 220 В?

2.4.14. Вольтметр подключен к зажимам источника тока. Внешняя цепь замкнута. Что при этом измеряет вольтметр?

2.4.15. Как вольтметром, имеющим один предел измерения, измерить напряжение, превышающее его предел измерения?

2.4.16. Почему гальванический элемент с небольшим значением ЭДС (порядка нескольких вольт) может дать значительный ток, а электростатическая машина с ЭДС порядка 1000 В дает ничтожный ток?

2.4.17. Почему при включении в сеть нагревательного прибора большой мощности накал лампочек в квартире заметно падает, а затем возрастает, достигая практически прежнего уровня?

2.4.18. Как изменится плотность тока, если увеличить длину проводника вдвое, не изменяя поперечного сечения проводника и приложенной к нему разности потенциалов?

2.4.19. Как изменится дрейфовая скорость электронов в проводнике, если увеличить в два раза силу тока в проводнике, не изменяя его длину и поперечное сечение?

2.4.20. Как изменится мощность тока, выделяемая на некотором участке цепи, при увеличении напряжения на этом участке в три раза?

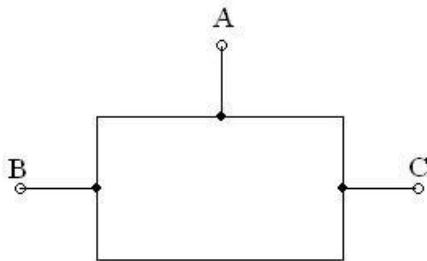
2.4.21. Как изменится мощность тока в проводнике, если увеличить вдвое поперечное сечение проводника, не изменяя его длину и приложенную к нему разность потенциалов?

2.4.22. Как изменится количество теплоты, выделяемое в единицу времени в спирали электроплитки при уменьшении длины спирали в два раза и увеличении силы тока в два раза?

2.4.23. Во сколько раз внешнее сопротивление источника должно быть больше внутреннего, чтобы при расчетах (пренебрегая внутренним сопротивлением) относительная погрешность не превышала 1%?

2.4.24. При последовательном подключении к сети двух резисторов сила тока в 6,25 раз меньше чем при параллельном подключении этих резисторов. Во сколько раз отличаются сопротивления резисторов?

2.4.25. «Черный ящик» имеет три клеммы А, В, С (см. рис.) Известно, что он содержит только резисторы. Сопротивления «черного ящика» при подключении к различным парам клемм таковы: $R_{AB} = 5 \text{ Ом}$, $R_{BC} = 8 \text{ Ом}$, $R_{AC} = 9 \text{ Ом}$. Предложите схему «черного ящика», содержащего минимальное число резисторов.



2.4.26. Какие значения сопротивлений можно получить, имея в своем распоряжении три резистора сопротивлением 60 Ом каждый?

2.4.27. Найти связь между кулоном и применяемой на практике (для аккумуляторов и гальванических элементов) единице заряда «ампер-час».

2.4.28. Прибор имеет три нагревательные спирали по 120 Ом каждая. Какие мощности можно получить, используя различные соединения спиралей? Напряжение в сети 220 В.

2.4.29. Три тонких проволоки одинакового сечения – железная, медная и алюминиевая – соединены последовательно. Их подключают к источнику высокого напряжения, и одна из них перегорает. Какая? Начальная температура 0°C . ($\rho_{\text{Fe}} = 9 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{Al}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$)

2.4.30. Три тонких проволоки одинакового сечения – железная, медная и алюминиевая – соединены параллельно. Их подключают к источнику высокого напряжения, и одна из них перегорает. Какая? Начальная температура 0°C .

2.5. Задачи для контрольных работ

Законы постоянного тока

2.5.1. Определите среднюю скорость направленного движения электронов в медных проводах при максимально допустимой для них плотности тока 10 А/мм^2 ? Концентрацию носителей тока принять равной 10^{29} м^{-3} .

2.5.2. К концам стального проводника длиной 20 м приложено напряжение 3,6 В. Определите среднюю скорость электронов в проводнике, если их концентрация $4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Удельное сопротивление стали $\rho = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

2.5.3. Определите силу тока, проходящего между электродами установки для франклинизации пациента за 10 мин процедуры, соответствующую заряду $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Кл}$.

2.5.4. В синхротроне электроны движутся по приближённо круговой орбите длины 240 м. Во время цикла ускорения по орбите, со скоростью $0,7 \cdot c$, где c – скорость света, движется 10^{11} электронов. Определите силу тока.

2.5.5. В рентгеновской трубке пучок электронов с плотностью тока $0,3 \text{ А/мм}^2$ попадает на скошенный под углом 30° анода площадью 10^{-4} м^2 . Считая, что анод расположен вдоль оси пучка. Определите силу ток в рентгеновской трубке.

2.5.6. Какой заряд переносится за 10 с, если 1) ток равномерно возрастает от 0 до 3 А; 2) ток убывает от 20 А до 0, при этом за каждые 0,01 с он убывает вдвое?

2.5.7. Металлический шар радиуса 15 см поместили в поток протонов с плотностью тока 1 мкА/см². За какое время его потенциал достигнет значения 220 В?

2.5.8. К цилиндру длиной L и поперечным сечением S , выполненному из проводящего материала удельной проводимостью δ , подведено напряжение U . Какой ток течёт через сечение цилиндра и каково его сопротивление?

2.5.9. Сила тока в цепи изменяется по закону $I = I_0 \sin(\omega t)$, где $I_0 = 10$ А. Определите количество теплоты, выделившееся в проводнике сопротивлением 10 Ом за время, равное четверти периода. Период равен 10 с.

2.5.10. Сила тока I в проводнике меняется со временем t согласно уравнению

$I = 8 + 4 \cdot t$, где I выражено в амперах, а t – в секундах. 1) Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника за промежуток времени от $t_1 = 2$ с до $t_2 = 6$ с? 2) При какой силе постоянного тока через поперечное сечение проводника за это же время проходит равное количество электричества?

2.5.11. По медной проволоке сечением $5 \cdot 10^{-6}$ м² и при температуре 320 К проходит ток 1,5 А. Считая, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости и что электронный газ подчиняется распределению Максвелла, определите, во сколько раз отличаются средние скорости теплового движения свободных электронов от скорости их упорядоченного движения.

2.5.12. Считая свободные электроны металла идеальным газом, определите коэффициент теплопроводности серебра при температуре 300 К. Удельное сопротивление серебра при этой температуре $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

2.5.13. Напряжение на концах проводника сопротивлением 5 Ом за 0,5 с равномерно возрастает от 0 В до 20 В. Определите заряд, который пройдет по проводнику за это время.

2.5.14. Определите ток утечки в плоском конденсаторе, если электростатическое поле между его обкладками равно 10 кВ/м, площадь обкладок 100 см², удельная проводимость диэлектрика 10^{-10} Ом⁻¹·м⁻¹.

2.5.15. Угольный стержень соединён последовательно с железным стержнем такой же толщины. При каком соотношении между длинами стержней их общее сопротивление не зависит от температуры?

Удельные сопротивления и температурные коэффициенты сопротивления железа и графита соответственно равны: $98 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $3900 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $6,2 \cdot 10^{-3}$ и $-0,8 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

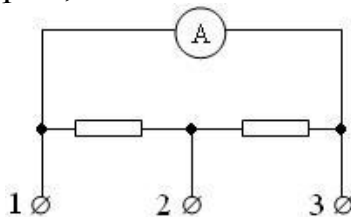
2.5.16. В медном проводнике сечением 4 мм^2 и длиной 10 м течет ток. За 3 мин в нем выделяется 36 Дж теплоты. Определите напряженность поля, плотность и силу тока в проводнике.

2.5.17. Электрическая цепь составлена из трёх проводников одинаковой длины и одного материала сечениями 1 , 2 и 3 мм^2 . Разность потенциалов на концах цепи 22 В . Определите падение напряжения на каждом проводнике при их последовательном соединении.

2.5.18. Два металлических шара диаметром $0,2 \text{ м}$ опущены на изолированных кабелях в океан на большую глубину. Расстояние между центрами шаров 250 м , удельная электропроводимость морской воды $4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Определите сопротивление цепи при подключении источника к концам кабелей, оставшихся на поверхности воды. Сопротивление кабелей не учитывать.

2.5.19. Найдите падение потенциала U на медном проводе длиной $L = 500 \text{ м}$ и диаметром $d = 2 \text{ мм}$, если ток в нем $I = 2 \text{ А}$.

2.5.20. К амперметру подключены два шунта (добавочные сопротивления) (см. рис.). Шкала амперметра содержит 100 делений. Если амперметр включить в цепь через клеммы 1-2, цена деления шкалы его будет $0,01 \text{ А/дел}$, если через клеммы 2-3 - цена деления будет $0,02 \text{ А/дел}$. Какой ток можно измерять амперметром, подключив его к клеммам 1-3?



2.5.21. Имеется прибор сопротивлением 100 Ом , с ценой деления 1 мкА , шкала которого имеет 100 делений. Как из него сделать амперметр для измерения тока до 1 А ?

2.5.22. Амперметр сопротивлением $0,2\ \text{Ом}$ шунтирован сопротивлением $0,06\ \text{Ом}$. Определите силу тока во внешней цепи, если ток через амперметр $10\ \text{А}$.

2.5.23. Сколько витков нихромовой проволоки диаметром $1\ \text{мм}$ надо намотать, в один слой, на фарфоровый цилиндр радиусом $2,5\ \text{см}$, чтобы получить печь сопротивлением $40\ \text{Ом}$?

2.5.24. Сопротивление вольфрамовой нити накала электрической лампочки при 20°C равно $35,8\ \text{Ом}$. Определите температуру нити лампочки, если при включении в сеть напряжением $120\ \text{В}$ по нити идет ток $0,33\ \text{А}$? Температурный коэффициент сопротивления вольфрама равен $4,6 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$.

2.5.25. Реостат из железной проволоки, миллиамперметр, и генератор тока включены последовательно. Сопротивление реостата при 0°C равно $120\ \text{Ом}$, сопротивление миллиамперметра $20\ \text{Ом}$. Миллиамперметр показывает $22\ \text{мА}$. Что будет показывать миллиамперметр, если реостат нагреется на 50° ? Температурный коэффициент сопротивления железа $6 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$. Сопротивлением генератора пренебречь.

2.5.26. Обмотка катушки из медной проволоки при температуре 14°C имеет сопротивление $10\ \text{Ом}$. После пропускания тока сопротивление обмотки стало равно $12,2\ \text{Ом}$. До какой температуры нагрелась обмотка? Температурный коэффициент сопротивления меди равен $4,15 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$.

2.5.27. На сколько изменится сопротивление телеграфной линии при переходе от зимы (-30°C) к лету ($+30^\circ\text{C}$), если она проложена железным проводом длиной (зимой) $100\ \text{км}$? Удельное сопротивление железа $8,7 \cdot 10^{-6}\ \text{Ом}\cdot\text{см}$, температурный коэффициент сопротивления $6 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$. Изменится ли результат, если учесть удлинение провода? Коэффициент линейного расширения железа $12 \cdot 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$.

2.5.28. Вольтметр сопротивлением $1500\ \text{Ом}$ рассчитан для измерения напряжения не выше $30\ \text{В}$. Какое добавочное сопротивление нужно присоединить к вольтметру, чтобы им можно было измерить напряжение $300\ \text{В}$.

2.5.29. Имеется некоторое число одинаковых сопротивлений $10\ \text{Ом}$. Сколько потребуется сопротивлений и как их нужно соединить (нарисуйте схему), чтобы эквивалентное сопротивление было равно $6\ \text{Ом}$?

2.5.30. Определите, какой силы ток возникает в электрической лампе, работающей под напряжением 220 В, если ее вольфрамовая нить нагревается до 2000 °С? Сопротивление нити при 20 °С равно 40 Ом.

2.5.31. Замкнутая цепь содержит сопротивление 10 Ом и источник с ЭДС равной 1 В. К ней параллельно подключаются три участка цепи, имеющих сопротивления и ЭДС, увеличенные соответственно в 2,3 и 4 раза (20 Ом–2 В, 30 Ом–3 В и т.д.). Определите токи на этих участках цепи, если “плюс” первого источника соединен с “минусом” второго, “плюсом” третьего и “минусом” четвертого.

2.5.32. Какое внешнее сопротивление R необходимо подключить к источнику постоянного тока с электродвижущей силой $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r , чтобы выделяемая на нем тепловая мощность была максимальной?

2.5.33. Элемент, с ЭДС равной 1,1 В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом, замкнут на внешнее сопротивление $R = 9$ Ом. Определите ток в цепи, падение потенциала во внешней цепи и падение потенциала внутри элемента. С каким КПД работает элемент?

2.5.34. Элемент с ЭДС равной 2 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом замкнут на внешнее сопротивление. Определите падение потенциала внутри элемента при силе тока в цепи 0,25 А и внешнее сопротивление R цепи при этих условиях?

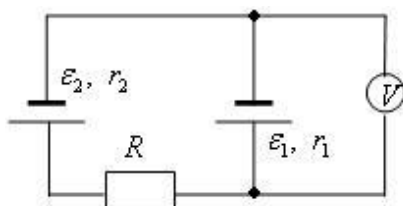
2.5.35. ЭДС элемента 6 В. При внешнем сопротивлении $R = 1,1$ Ом сила тока в цепи равняется 3 А. Определите падение потенциала U внутри элемента и его внутреннее сопротивление r .

2.5.36. В лаборатории, удаленной от генератора на расстоянии $L = 100$ м, включили электрический нагревательный прибор, потребляющий ток $I = 10$ А. Определите, на сколько понизилось напряжение U на зажимах электрической лампочки, горящей в этой лаборатории, если сечение медных подводящих проводов $S = 5$ мм²?

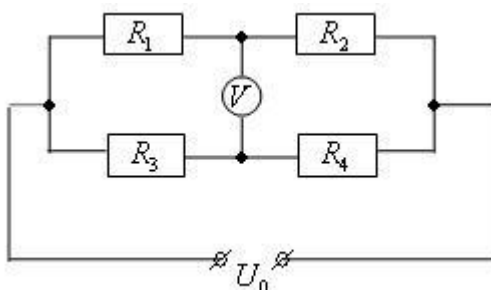
2.5.37. Элемент с ЭДС равной 1,6 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом замкнут на внешнее сопротивление. Определите КПД элемента при силе тока в цепи 2,4 А.

2.5.38. Элемент, сопротивление и амперметр включены в цепь последовательно. Элемент имеет ЭДС 2 В и внутреннее сопротивление $r = 0,4$ Ом. Амперметр показывает ток $I = 1$ А. Определите КПД элемента.

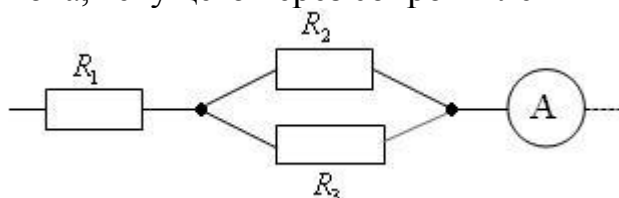
2.5.39. Найдите напряжение, которое покажет вольтметр, включенный в схему так, как показано на рисунке. ЭДС источников тока и их внутренние сопротивления равны соответственно ε_1 , r_1 и ε_2 , r_2 . Сопротивление нагрузки равно R .



2.5.40. Найдите напряжение, которое покажет высокоомный вольтметр, включенный в схему так, как показано на рисунке. Сопротивления резисторов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 и напряжение U_0 известны.



2.5.41. Определите падение потенциала на сопротивлениях $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 2$ Ом и $R_3 = 4$ Ом (см. рисунок), если амперметр показывает силу тока 3 А. Найдите силу тока, текущего через сопротивления R_2 и R_3 .



2.5.42. ЭДС батареи 12 В. При силе тока 4 А к.п.д. батареи равно 0,8. Определите внутреннее сопротивление батареи.

2.5.43. Под конец зарядки батареи аккумуляторов током силой 5 А присоединённый к ней вольтметр показывал напряжение 6,5 В. В начале разрядки той же батареи током силой 6 А вольтметр показывал напряжение 5,2 В. Пренебрегая током, проходящим через вольтметр, определите ЭДС и внутреннее сопротивление батареи.

2.5.44. Вольтметр, соединённый последовательно с сопротивлением 10000 Ом, показывает напряжение 75 В, а соединённый последовательно с неизвестным сопротивлением 15 В. Определите это сопротивление, если внешнее напряжение 120 В.

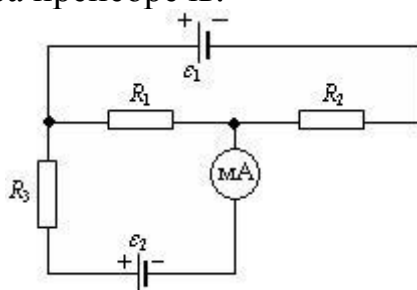
2.5.45. Генератор постоянного тока с ЭДС 130 В даёт ток в сеть, состоящую из параллельно включенных 15 ламп сопротивлением 200 Ом и 10 ламп сопротивлением 100 Ом каждая. Определите ток нагрузки и напряжение на зажимах генератора, если его внутреннее сопротивление 0,4 Ом. Сопротивлением проводов пренебречь.

2.5.46. Получите условие, при котором ток, даваемый двумя соединёнными последовательно батарейками, ЭДС и внутреннее сопротивление которых равны соответственно ε_1 , ε_2 и r_1 , r_2 , будет меньше тока, даваемого первым из них, если они включены на сопротивление R.

2.5.47. Два аккумулятора с ЭДС 1,5 В и 2 В и внутренними сопротивлениями 0,15 Ом, 0,3 Ом соединены параллельно. Определите ток в батарее и напряжение на её зажимах.

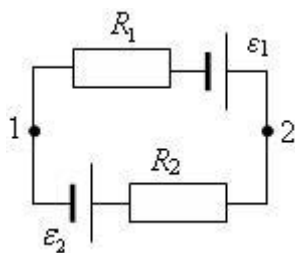
2.5.48. Гальванический элемент даёт на внешнем сопротивлении 6 Ом ток 0,15 А, а на сопротивлении 10 Ом ток 0,1 А. Определите ток короткого замыкания.

2.5.49. В электрическую цепь включены резисторы $R_1=2$ Ом, $R_2=50$ Ом, $R_3=20$ Ом, источники $\varepsilon_1=2$ В и ε_2 . Амперметр показывает ток 50 мА. Определите силу тока в резисторах и ε_2 . Внутренним сопротивлением источников и амперметра пренебречь.



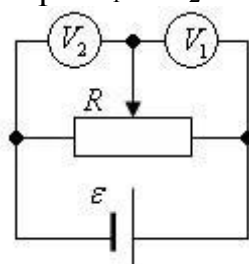
2.5.50. Если к аккумулятору подключить последовательно амперметр и вольтметр, то они покажут 0,2 А и 16 В. Если приборы соединить параллельно и подключить к источнику, они покажут 1,2 А и 2 В. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление аккумулятора.

2.5.51. Найдите разность потенциалов между точками 1 и 2, если $R_1=15$ Ом, $R_2=25$ Ом, $\varepsilon_1=6$ В и $\varepsilon_2=1,5$ В. Внутренними сопротивлениями источников можно пренебречь.



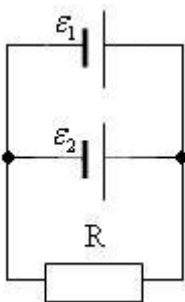
2.5.52. Имеется 10 элементов с ЭДС 1,2 В и внутренним сопротивлением 0,3 Ом. Как нужно соединить эти элементы, чтобы получить от батареи наибольший ток? Определите его величину.

2.5.53. В схеме сопротивления вольтметров 3 и 4 кОм, сопротивление потенциометра 1 кОм, источника 0,01 кОм. Определите, при каком соотношении плеч потенциометра $U_1=2U_2$?



2.5.54. Если несколько элементов с внутренним сопротивлением 2,4 Ом соединить последовательно и замкнуть на сопротивление 12 Ом, то по цепи пойдёт ток 0,44 А. Если соединить элементы параллельно, то пойдёт ток, сила которого равна 0,123 А. Определите максимально возможный ток во внешней цепи.

2.5.55. В схеме $R = 2$ Ом, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 3,2$ В, $r_1 = 0,5$ и $r_2 = 0,8$ Ом. Определите ток в каждом элементе и во всей цепи.

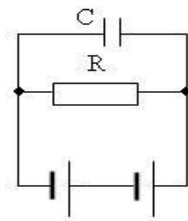


2.5.56. ЭДС генератора 12 В, внутреннее сопротивление 0,6 Ом. Определите ток в цепи, если КПД элемента 60%.

2.5.57. Определите напряжение, которое нужно подать на катушку с 1000 витками медного провода, если диаметр витков 4 см, плотность тока 3 А/мм², а удельное сопротивление меди $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

2.5.58. Динамо-машина с внутренним сопротивлением $r = 0,86$ Ом питает ток $n = 50$ ламп, соединённых параллельно. Каждая имеет сопротивление $R = 1000$ Ом, сопротивление всей линии $R_1 = 2$ Ом. Определите ЭДС машины и напряжение на её зажимах, если напряжение лампочек 220 В.

2.5.59. Определите ЭДС батареи, если напряжённость электростатического поля конденсатора $E = 1200$ В/м, внутреннее сопротивление батареи $r = 0,5$ Ом, сопротивление $R = 6$ Ом, а расстояние между пластинами конденсатора $0,1$ см.



2.5.60. К клеммам источника с внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом подключены два параллельно соединённых сопротивления $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 2$ Ом. Определите отношение токов, протекающих через первое сопротивление до и после обрыва в цепи второго сопротивления.

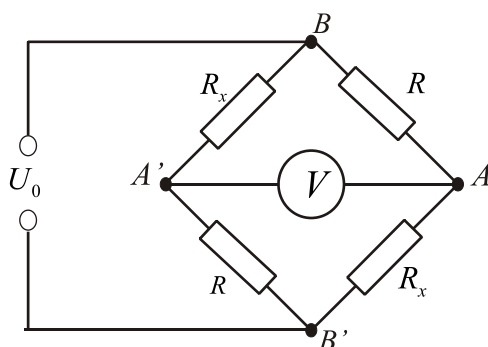
2.5.61. В цепь включены последовательно медная и стальная проволоки одинаковой длины и диаметра. Найдите: а) отношение количества теплоты, выделяющихся в этих проволоках; б) отношение падений напряжения на этих проволоках.

2.5.62. От генератора с ЭДС равной 110 В требуется передать энергию на расстояние $l = 250$ м. Потребляемая мощность в сети $P = 1$ кВт. Определите минимальное сечение S медных подводящих проводов, если потери мощности в сети не должны превышать 1% .

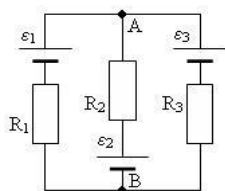
2.5.63. От батареи с ЭДС равной 500 В требуется передать энергию на расстояние $L = 2,5$ км. Потребляемая мощность в сети $P = 10$ кВт. Определите минимальные потери мощности в сети, если диаметр медных проводов $d = 1,5$ мм.

Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа

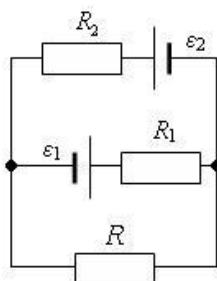
2.5.64. Резисторы и вольтметр включены в цепь переменного тока, как показано на рисунке. Напряжение между точками A и A' втрое меньше напряжения между точками B и B' . Найдите сопротивление R_x , если сопротивление R известно.



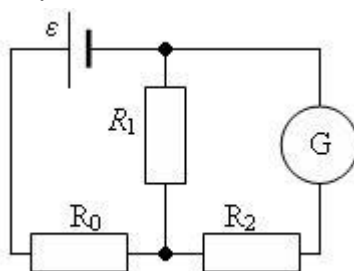
2.5.65. В схеме на рис. $\varepsilon = 3$ В, $\varepsilon = 4$ В, $\varepsilon = 5$ В, сопротивления $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 40$ Ом, $R_3 = 60$ Ом. Пренебрегая внутренним сопротивлением источников, определите: 1) силу тока через сопротивление R_1 ; 2) разность потенциалов между точками А и В.



2.5.66. Определите величину и направление тока через сопротивление R в схеме, если $\varepsilon_1 = 1,7$ В, $\varepsilon_2 = 4$ В, $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 40$ Ом и $R = 6$ Ом. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.



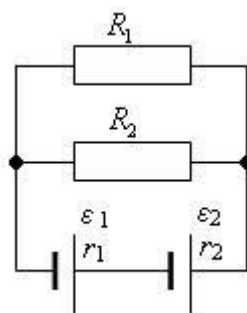
2.5.67. Для определения чувствительности гальванометра используется изображённая схема. Определите его чувствительность, если при $R_0 = 10^5$ Ом, $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 2 \cdot 10^5$ Ом, $R_G = 2200$ Ом и $\varepsilon = 1$ В, зайчик на шкале отклоняется на пять делений.



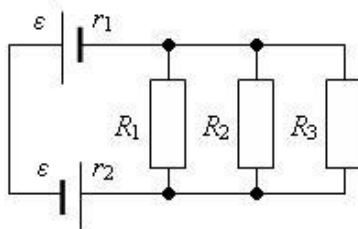
2.5.68. Генератор с ЭДС 120 В и внутренним сопротивлением 2,5 Ом соединён последовательно с нагревательным прибором сопротивлением 20 Ом. Определите силу тока, протекающего по цепи, и заряд, прошедший по ней за 4 часа.

2.5.69. Определите, как изменится ток во внешней цепи, сопротивление которой $R = 4$ Ом, если десять одинаковых элементов первоначально соединить между собой последовательно, а затем параллельно? ЭДС элемента 4 В, $r = 0,4$ Ом.

2.5.70. Определите внутреннее сопротивление элемента r_1 , если разность потенциалов на его зажимах равна нулю. $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 12$ Ом, $r_2 = 0,8$ Ом. ЭДС элементов одинаковы.

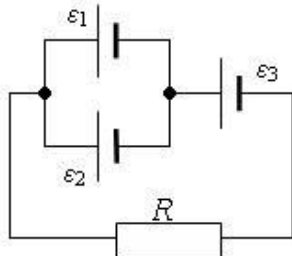


2.5.71. При каком соотношении между сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , r_1 и r_2 разность потенциалов на зажимах одного из элементов будет равна нулю? ЭДС источников одинаковы.



2.5.72. Генератор постоянного тока с $\varepsilon_1 = 24$ В и внутренним сопротивлением 0,4 Ом заряжает батарею аккумуляторов с $\varepsilon_2 = 20$ В и внутренним сопротивлением 0,8 Ом. Параллельно батарее включена лампа сопротивления 4 Ом. Определите силы токов в батарее аккумуляторов и в лампочке.

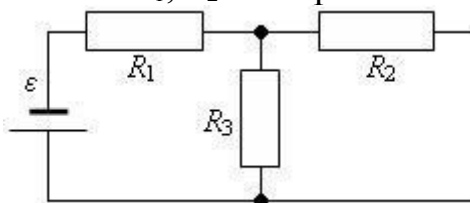
2.5.73. Три элемента с $\varepsilon_1 = 1,3$ В, $\varepsilon_2 = 1,5$ В, $\varepsilon_3 = 2$ В, $r_1 = r_2 = r_3 = 0,2$ Ом включены, как показано на схеме. Определите токи в элементах J_1 , J_2 , J_3 , если сопротивление $R = 0,5$ Ом.



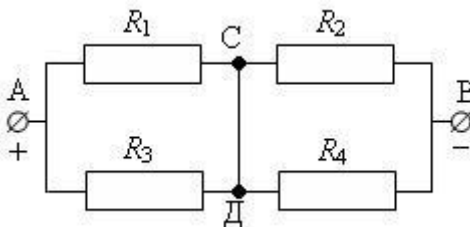
2.5.74. Батарея с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением $r = 1,2$ Ом питает внешнюю цепь, которая состоит из двух параллельно соединённых ламп сопротивлением 4 Ом и 10 Ом. Определите разность потенциалов на зажимах батареи и токи в лампах.

2.5.75. Необходимо создать ток 16 А в цепи с сопротивлением 10 Ом. Определите, какое наименьшее количество аккумуляторов следует для этого взять, как их соединить в смешанную батарею, если $\varepsilon = 2$ В, $r = 0,5$ Ом для каждого аккумулятора?

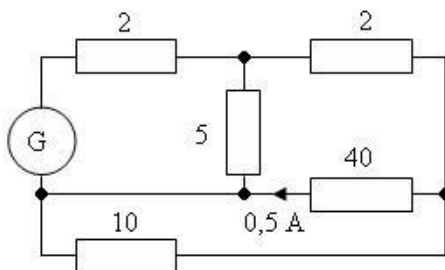
2.5.76. В схеме сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и J_3 известны. Определите токи, текущие через сопротивления R_1 , R_2 и напряжение на батарее.



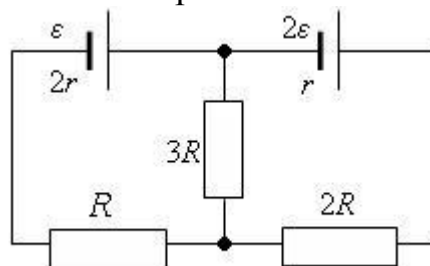
2.5.77. Между точками А и В цепи поддерживается постоянное напряжение 50 В. Определите силу ток и напряжение в участке СД, если $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $R_4 = 8$ Ом.



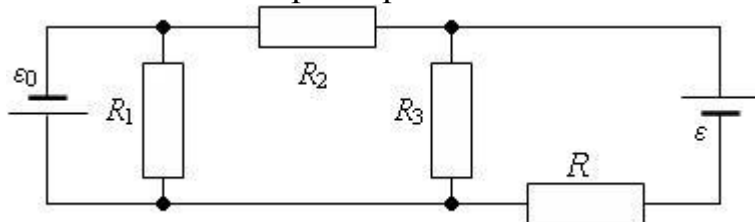
2.5.78. На схеме, изображённой на рисунке, указаны сопротивления в Омах и ток через одно из них. Определите силы токов текущих через остальные сопротивления и напряжение генератора G.



2.5.79. Определите силу тока в сопротивлении $3R$ в изображённой схеме.



2.5.80. Выразите ток через сопротивление R в схеме. Внутренними сопротивлениями источников пренебречь.



Работа, энергия и мощность постоянного тока

2.5.81. Определите работу тока на участке, не содержащем источник ЭДС и имеющем сопротивление 28 Ом, если ток за 10 с равномерно увеличился от 1 до 15 А.

2.5.82. Для накала нити электронной лампы необходимо напряжение 4 В и ток 0,6 А. Из-за испарения при нагревании материала нити диаметр её уменьшился на 10%. Определите ток и напряжение, которое необходимо для поддержания прежней температуры.

2.5.83. Сколько витков никелевой проволоки диаметром 0,1 мм надо намотать на фарфоровый цилиндр диаметра 2 см, чтобы устроить кипятильник, с помощью которого за 10 мин закипит 200 г воды с начальной температурой 10 °С. Считать, что 60% электрической энергии идёт на нагревание воды, теплоёмкость воды $4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, удельное сопротивление никеля $0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, напряжение в сети 120 В.

2.5.84. Электромотор, сопротивление обмотки которого 6 Ом, подключён к генератору постоянного тока с ЭДС 240 В и внутренним сопротивлением 2 Ом. Определите КПД электромотора, если через его обмотку проходит ток 8 А.

2.5.85. Момент сил сопротивления, действующих на вал электромотора, равен M . Мотор питается от источника с ЭДС равной ε , сопротивление всей цепи R . Определите скорость вращения вала мотора, если ток в цепи J .

2.5.86. В цепь батареи с ЭДС 60 В включён электромотор, потребляющий при нагрузке мощность в 10 раз большую, чем при работе вхолостую. При этом разность потенциалов на клеммах падает на 10%. Определите мощность тепловых потерь в проводящих проводах при холостом ходе, если нагрузочный ток 10 А.

2.5.87. При зарядке аккумулятора затрачена энергия 1 кВт·ч. При разрядке на сопротивление 10 Ом ЭДС аккумулятора равномерно убывала с 26 до 18 В за 10 часов. Определите ёмкость q аккумулятора и его КПД.

2.5.88. Свинцовая проволока диаметром d плавится при длительном пропускании тока, сила которого равна J_1 . Определите, при какой силе тока расплавится проволока диаметром $2d$, если время нагревания одинаково. Потери теплоты проволокой пропорциональны её поверхности.

2.5.89. Нагреватель выполнен из проволоки длиной l_1 , диаметром d_1 и рассчитан на напряжение U_1 . Определите, какими должны быть длина и диаметр сечения проволоки, чтобы при напряжении U_2 нагреватель потребовал ту же мощность? Теплопередача проволоки пропорциональна её поверхности.

2.5.90. Батарея с ЭДС равной 240 В и внутренним сопротивлением $r=1$ Ом замкнута на внешнее сопротивление $R=23$ Ом. Найдите полную мощность P_0 , полезную мощность P и КПД батареи.

2.5.91. Три одинаковые батареи подсоединяют к сопротивлению $R=10$ Ом, соединив их первый раз параллельно, а второй – последовательно друг с другом. Мощность, выделяемая на сопротивлении, во втором случае в 4 раза превышает мощность, выделяемую в первом случае. Определите внутреннее сопротивление батареи.

2.5.92. Пять элементов, ЭДС каждого из которых 1,4 В и внутреннее сопротивление 0,3 Ом, соединены в батарею. Определите ток, при котором полезная мощность её будет равна 8 Вт, а так же наибольшую полезную мощность.

2.5.93. Электромотор постоянного тока сопротивлением R подключен к источнику, напряжение которого равно U . При каком значении тока через обмотку полезная мощность мотора максимальна? Определите её и КПД мотора.

2.5.94. В цепь батареи с ЭДС равной $\varepsilon = 24 \text{ В}$ включают электромотор. Нагруженный мотор потребляет мощность в $n = 10$ раз большую, чем при работе вхолостую. Разность потенциалов U на клеммах мотора при нагрузке падает на 20% по сравнению с разностью потенциалов на холостом ходе U_1 . Ток через мотор при нагрузке $I = 5 \text{ А}$. Определите сопротивление подводящих проводов. Величиной внутреннего сопротивления батареи пренебречь.

2.5.95. Определите мощность лампочки Лодыгина, в которой использован угольный стержень в качестве нагревательного элемента, если он имеет длину 6 см, диаметр 2 мм. Удельное сопротивление угля $7 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, температурный коэффициент сопротивления $2 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$. Температура накала стержня 1600°С . Напряжение питания 6 В.

2.5.96. Светотепловая ванна, имеющая 20 параллельно соединённых ламп накаливания сопротивлением 360 Ом каждая, включена в сеть с напряжением 220 В. Определите количество теплоты, выделившееся в ванне за 15 минут процедуры.

2.5.97. Через какое время в стерилизаторе с обмоткой из проволоки сопротивлением 25 Ом закипит 1 л воды с начальной температурой 18°С . Стерилизатор подключён к сети напряжением 220 В, его КПД составляет 50%, удельная теплоёмкость воды $4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/м} \cdot \text{К}$.

2.5.98. Две электроплитки соединены параллельно и потребляют мощность, равную P . Какую мощность они будут потреблять, включённые последовательно, если одна из них потребляет мощность P_1 ?

2.5.99. В старой аккумуляторной батарее, состоящей из n последовательно соединённых аккумуляторов с внутренним сопротивлением r , внутреннее сопротивление одного из них резко возросло до $10 \cdot r$. Считая ЭДС аккумуляторов одинаковой, определите при каком сопротивлении нагрузки мощность, выделяемая на ней, не изменится при коротком замыкании повреждённого аккумулятора.

2.5.100. Аккумулятор подключён один раз к внешней цепи с сопротивлением R_1 , а другой с R_2 . Количество теплоты, выделяющееся во внешней цепи в единицу времени одинаково. Определите внутреннее сопротивление аккумулятора.

2.5.101. От источника напряжения 20 кВ необходимо передать на расстояние 10 км мощность 800 кВт. Допустимая потеря напряжения в проводах 1%. Определите сечение медного провода, если удельное сопротивление меди $0,17 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Во сколько раз необходимо повысить напряжение источника, чтобы снизить потери мощности в 50 раз?

2.5.102. Определите, как зависит мощность генератора, выделяемая на внутреннем сопротивлении r , от силы тока I если напряжение генератора $\mathcal{E}$? Какому сопротивлению соответствует максимальная мощность?

2.5.103. Электромотор питается от источника с напряжением $U = 24$ В. Определите развиваемую мотором мощность при протекании по его обмотке тока $I = 8$ А, если известно, что при полном затормаживании якоря по цепи идет ток $I_0 = 16$ А.

2.5.104. Сопротивления стальной проволоки в два раза больше, чем медной. Определите, в которой из проволок будет выделяться больше тепла: а) при параллельном, б) при последовательном включении в цепь постоянного напряжения.

2.5.105. Аккумулятор замыкают один раз внешней цепью с сопротивлением R_1 , другой раз R_2 . Определите, при какой величине внутреннего сопротивления r количество тепла, выделяющегося во внешней цепи, одинаково в обоих случаях.

2.5.106. Определите, какую ЭДС развивает генератор постоянного тока, если при сопротивлении цепи 500 Ом на вращение якоря затрачивается 80 Вт? Потери мощности на трение составляют 5%.

2.5.107. В цепь источника с ЭДС 60 В включён электромотор с помощью проводов сопротивлением 2 Ом. Напряжение при нагрузке мотора падает на 15% по сравнению с напряжением на холостом ходу. Определите, во сколько раз мощность, потребляемая мотором при нагрузке, больше мощности, потребляемой на холостом ходу, если ток в цепи при нагрузке 8 А?

2.5.108. Электроэнергия генератора мощностью P передается потребителю по проводам, сопротивление которых R . Определите КПД линии передачи, если ЭДС генератора равняется $\mathcal{E}$, а его внутренним сопротивлением можно пренебречь.

2.5.109. К аккумулятору с внутренним сопротивлением 1 Ом подключен нагревательный прибор с сопротивлением 50 Ом. Определите, как

изменится мощность, выделяющаяся во внешней цепи, если параллельно с первым нагревателем подключить второй такой же нагреватель?

2.5.110. Электровоз массой 500 т движется с горы уклоном 0,01 со скоростью 36 км/ч. Определите, какой ток протекает через мотор электровоза, если напряжение сети равняется 35 кВ, сила сопротивления движению составляет 5% от его веса, а КПД равняется 80%?

2.6. Вопросы

1. Понятие об электрическом токе. Сила тока. Вектор плотности тока.
2. Носители электрического заряда. Классическая теория электропроводности металлов.
3. ЭДС источника. Разность потенциалов. Напряжение.
4. Закон Ома для однородного участка цепи в дифференциальной и интегральной форме.
5. Закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.
6. Последовательное и параллельное соединение проводников.
7. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа.
8. Закон Джоуля - Ленца в интегральной и дифференциальной форме. Вывод из классических представлений.
9. Закон Видемана-Франца. Затруднения классической электронной теории проводимости металлов.
10. Работа выхода электрона из металла. Термоэлектронная эмиссия.
11. Явление Зеебека и Пельтье.
12. Ток в газах. Самостоятельный и несамостоятельный разряды.
13. Ток в электролитах. Закон Фарадея.
14. Ток в полупроводниках. Полупроводники с электронными и дырочными типами проводимости.

3. Электромагнетизм

3.1. Основные понятия и закономерности

Магнитостатика

Электромагнетизм – раздел физики, изучающий электромагнитное взаимодействие частиц и тел, обладающих электрическим зарядом.

- Магнитная составляющая силы, с которой взаимодействуют два движущихся со скоростями $\vec{v}$, $\vec{v}'$ электрических заряда на расстоянии r друг от друга:

$$d\vec{F}_{\text{маг}} = k \frac{[dq' \vec{v}' [dq \vec{v} \vec{r}]]}{r^3},$$

$k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ - коэффициент пропорциональности.

- Сила, с которой взаимодействуют два элемента токов $d\vec{l}$, $d\vec{l}'$:

$$d\vec{F}_{\text{маг}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[I' d\vec{l}' [Id\vec{l} \vec{r}]]}{r^3}.$$

- Закон Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l} \vec{r}]}{r^3}.$$

Принцип суперпозиции: если поле создано несколькими токами, то

индукция результирующего поля: $\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$, $\vec{B} = \int d\vec{B}$.

- Магнитная индукция поля прямолинейного тока:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \text{ – конечных размеров;}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \text{ – бесконечно длинного;}$$

$$B = \frac{\mu_0 r^2 I}{2(r^2 + h^2)^{3/2}} \text{ – кругового контура радиуса } r \text{ на расстоянии } h,$$

по оси, от его центра;

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \text{ – в центре контура.}$$

- Циркуляция вектора магнитной индукции по контуру L (закон полного тока)

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i.$$

- Индукция магнитного поля:
соленоида бесконечной длины

$$B = \mu_0 n I \text{ – без сердечника;}$$

$$B = \mu \mu_0 n I \text{ – с магнитным сердечником;}$$

тороида

$B = \mu_0 n I$, $n = \frac{N}{2\pi r_0}$, N – общее число витков, r_0 – радиус средней линии тора.

- Сила Ампера, действующая на элемент dl длины проводника с током I в магнитном поле индукции $\vec{B}$:

$$d\vec{F} = [I d\vec{l} \vec{B}].$$

- Сила взаимодействия двух бесконечно длинных проводников, токами I_1 , I_2 приходящаяся на единицу длины

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}, \quad r - \text{расстояние между проводниками.}$$

- Вращательный момент, действующий на контур с током I в магнитном поле:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}] - \text{в векторной форме,}$$

$$M = P_m B \sin \alpha - \text{в скалярной форме,}$$

где $P_m = I \cdot S \cdot \vec{n}$ – магнитный момент контура с током I , S – площадь контура, $\vec{n}$ – вектор нормали к ней.

- Потенциальная энергия контура с током в магнитном поле

$$dW = -dA = P_m B \sin \alpha d\alpha,$$

$$W = -P_m B \cos \alpha = -\vec{P}_m \vec{B}.$$

- Поток вектора $\vec{B}$:

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B dS \cos \alpha,$$

через элементарную площадку dS , $\alpha = \angle(\vec{B}; \vec{n})$;

$$\Phi_B = \int_S B_n dS -$$

– полный поток, в интегральной форме.

- Поток вектора магнитной индукции сквозь замкнутую поверхность

$$\Phi_B = \oint_S B_n dS = 0.$$

- Элементарная работа сил магнитного поля

$$dA = I d\Phi,$$

При перемещении проводника с током в магнитном поле на конечное расстояние

$$A = \int_0^\Phi I d\Phi = I \Phi.$$

- Сила Лоренца – сила, с которой магнитное поле действует на заряд q , движущийся в магнитном поле индукции $\vec{B}$ со скоростью $\vec{v}$,

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}] \text{ – в векторной форме;}$$

$$F = qvB \sin \alpha \text{ – в скалярной форме.}$$

- ЭДС Холла:

$$\varepsilon_x = \frac{I}{n \cdot q \cdot a \cdot b} B,$$

a, b – размер пластины, n – концентрация носителей заряда, $R_x = \frac{1}{nq}$ – постоянная Холла.

- Вектор намагниченности:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} = \chi \vec{H} = \chi \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \text{ – магнитный момент единицы объема магнетика,}$$

где

χ – объемная магнитная восприимчивость вещества;

$\mu = \frac{B}{B_0}$ – относительная магнитная проницаемость вещества,

показывающая, во сколько раз магнитное поле в веществе изменяется по сравнению с магнитным полем в вакууме

- Вектор напряженности поля:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}, \quad \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}.$$

- Орбитальный механический момент электрона:

$$\vec{L}_{orb} = m[\vec{r}\vec{v}], \quad r \text{ – радиус орбиты, } v \text{ – скорость электрона,}$$

гиромангнитное орбитальное отношение для электрона: $g = \frac{|e|}{2m},$

спиновое гиромангнитное отношение для электрона:

$$g_s = \frac{P_{ms}}{L_s} = \frac{|e|}{m}, \quad P_{ms} = \frac{|e|}{m} L_s,$$

P_{ms} – спиновой магнитный момент электрона.

**Явление электромагнитной индукции -
возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре
при изменении потокосцепления в нем.**

- Закон электромагнитной индукции – закон Фарадея-Ленца, при всяком изменении магнитного потока, сцепленного с контуром, в нем возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

- Индукционный ток возникает в замкнутом контуре $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}$ и имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует изменениям того магнитного поля, которое его вызывает.
- Полный магнитный поток или потокосцепление:

$$\psi = \sum_{i=1}^n \Phi_i,$$

$$\psi = N\Phi,$$

если все витки N пронизываются одним потоком Φ .

- ЭДС индукции, возникающая в равномерно вращающейся со скоростью ω катушке:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = N\varepsilon_0 \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где φ_0 – начальная фаза, $\omega t + \varphi_0$ – фаза ЭДС.

- ЭДС взаимной индукции:

$$\varepsilon_{i-2} = -(L_{21} \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L_{12}}{\partial t}),$$

возникает в электрической цепи при изменении потокосцепления взаимной индукции. $L_{21}=L_{12}$ – взаимная индуктивность – свойство цепей образовывать общие потокосцепления, когда по одной из них течет ток.

- Самоиндукция – потокосцепление самоиндукции, обусловленное током в этой цепи, L – индуктивность цепи.

Потокосцепление самоиндукции соленоида:

$$\psi = \mu_0 \mu n^2 V i, \quad V \text{ – объем соленоида,}$$

$$L = \mu_0 \mu n^2 V \text{ – индуктивность соленоида,}$$

Система уравнений Максвелла. Электромагнитные колебания и волны

Между электрическими зарядами и токами с одной стороны и создаваемыми ими электрическими и магнитными полями с другой существует связь. При всяком изменении магнитного поля возникает вихревое электрическое поле и наоборот. Теория Максвелла, представленная в математических уравнениях, отражает эти связи между электрическими и магнитными полями.

- Первое уравнение Максвелла в интегральном виде

$$\oint_L \vec{E}_{вихр} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

-переменное магнитное поле создает вихревое электрическое поле.

- Второе уравнение Максвелла – обобщение закона полного тока

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \mu \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} + \mu_0 I.$$

-переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное поле.

- Ток смещения:

$$I_{см} = \varepsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t},$$

циркуляция вектора магнитной индукции по произвольному контуру в вакууме определяется суммой тока смещения и тока проводимости, умноженной на μ_0 :

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{см} + I),$$

циркуляция вектора напряженности магнитного поля равна сумме токов смещения и проводимости:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{см} + I.$$

- Третье уравнение (теорема Гаусса) – поток вектора напряженности $\vec{E}$ через произвольную поверхность S определяется алгебраической суммой зарядов, охватываемых ею:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i.$$

- Четвертое уравнение – поток вектора магнитной индукции $\vec{B}$ через произвольную поверхность S равен нулю, т.к. в природе не существуют магнитные заряды:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

- Если в пространстве создано изменяющееся электрическое поле, то оно создает вихревое магнитное поле, силовые линии которого замыкаются вокруг вектора $\vec{E}$ в плоскости, перпендикулярной ему. Электрическое и магнитное поля, взаимно превращаясь и поддерживая друг друга, создают единое электромагнитное поле. Процесс распространения электромагнитного поля в пространстве называется электромагнитной волной.
- Скорость распространения волны – фазовая скорость:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \mu \varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu \varepsilon}} = \frac{c}{n}$$

в вакууме:

$$\mu = 1, \quad \varepsilon = 1, \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} - \text{скорость света в вакууме,}$$

скорость света в веществе:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu \varepsilon}} = \frac{c}{n},$$

где n – показатель преломления вещества.

- Уравнения электромагнитной волны:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t - k x), \quad \vec{B} = \vec{B}_0 \sin(\omega t - k x),$$

где x – координата точки наблюдения, ω – циклическая частота колебаний векторов $\vec{E}, \vec{B}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $\lambda = vT$ – длина волны, T – период.

- Энергия электромагнитной волны складывается из энергий электрического и магнитного полей. Плотность энергии:

$$\omega_E = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} - \text{электрического поля волны,}$$

$$\omega_B = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} - \text{магнитного поля волны,}$$

$$\omega = \omega_E + \omega_B = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} -$$

электромагнитного поля волны.

Вектор Умова-Пойтинга:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}].$$

- Объемная плотность импульса волны:

$$\vec{g} = \frac{[\vec{E}, \vec{H}]}{c^2}.$$

- Масса, связанная с энергией, переносимой электромагнитной волной:

$$m = \frac{W}{c^2},$$

где $W = \int_V \omega dV$ – полная энергия электромагнитного поля.

- Колебательный контур содержит конденсатор емкостью C , катушку индуктивностью L и резистор сопротивлением R , соединенных последовательно. Заряд на обкладках конденсатора изменяется со временем по закону:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

$q_0 e^{-\beta t}$ – амплитуда затухающих колебаний, $2\beta = \frac{R}{L}$ – коэффициент затухания,

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний,

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ – циклическая частота собственных, незатухающих колебаний, $T = 2\pi\sqrt{LC}$ – период свободных электромагнитных колебаний в контуре.

$\lambda = \beta T$ – логарифмический декремент затухания.

$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{2\beta} = \frac{\omega}{2\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}}$ – добротность колебательного контура.

3.2. Обозначения физических величин и единицы измерения

$\vec{B}$ – вектор индукции магнитного поля, Тл.

$\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля, А/м.

$\vec{P}_m$ – магнитный момент контура с током, А·м².

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

μ – магнитная проницаемость среды.

$\vec{J}$ – вектор намагничивания, А/м.

$\vec{F}_L, \vec{F}_A$ – силы Лоренца и Ампера, Н.

Φ – магнитный поток, Вб.

L – индуктивность, Гн.

W_B – энергия магнитного поля, Дж.

$\vec{M}$ – момент сил, Н·м.

T – период движения заряженной частицы, с.
 ω – плотность энергии магнитного поля, Дж/м³.
 Q – количество тепла, Дж.
 $\vec{S}$ – вектор Умова-Пойтинга, Вт/м².
 $\vec{g}$ – плотность импульса электромагнитного поля, кг м/с м³.

3.3. Примеры решения задач

1. По проволочному контуру, имеющему форму правильного шестиугольника, течет ток 2 (А). Напряженность магнитного поля в центре рамки 33 (А/м). Определить длину контура.

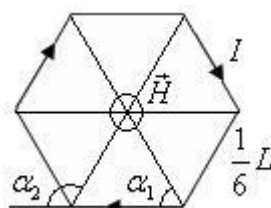
Дано:

$$I = 2 \text{ А}$$

$$H = 33 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$L - ?$$

Решение:



Магнитное поле в центре контура создается 6-ю проводниками. Величины напряженности поля, создаваемой каждым проводником, в центре рамки одинаковы. По принципу суперпозиции результирующий вектор напряженности поля в центре контура, направлен перпендикулярно плоскости рисунка, «от нас», в соответствии с правилом правого винта.

$$H = 6H_1,$$

где H_1 – напряженность поля, создаваемого одним проводником, определяется по формуле.

$$H_1 = \frac{I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

Из равностороннего треугольника (см. рис.)

$$\alpha_1 = 60^\circ, \quad \alpha_2 = 120^\circ, \quad \cos 60^\circ = \frac{1}{2}, \quad \cos 120^\circ = -\frac{1}{2}, \quad \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 = 1.$$

Найдем расстояние от проводника до центра рамки:

$$\frac{r \cdot 12}{l} = \operatorname{tg} 60^\circ, \quad r = \frac{l}{12} \operatorname{tg} 60^\circ = l \frac{\sqrt{3}}{12}.$$

Поскольку $H_1 = \frac{I}{4\pi r}$, $H = 6H_1 = \frac{6I \cdot 12}{4\pi l \cdot \sqrt{3}} = \frac{18I}{\pi l \sqrt{3}}$. Отсюда находим искомую

сторону рамки: $l = \frac{18I}{\pi \sqrt{3} H}.$

Размерность:

$$[l] = 1 \left[\frac{A \cdot m}{A} \right] = 1[m].$$

Вычисление:

$$l = \frac{18 \cdot 2}{3,14 \cdot 1,7 \cdot 33} = 0,2(m).$$

Ответ: $l = 0,2(m)$.

2. Протон и электрон, ускоренные электрическим полем, с одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона больше радиуса кривизны траектории электрона?

Дано:

$$q_e = q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

$$R_p / R_e - ?$$

Решение:

Заряженная частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов $\Delta\varphi = U$, приобретает кинетическую энергию: $W = qU = \frac{mv^2}{2}$.

В магнитном поле на частицу действует сила Лоренца, которая сообщает частице центростремительное ускорение. Если $\vec{v} \perp \vec{B}$, то сила Лоренца в таком случае равна $F = qvB$. С другой стороны центростремительное ускорение связано с силой Лоренца уравнением 2-го закона Ньютона:

$$F = ma_n = \frac{mv^2}{R} = qvB$$

Отсюда выражение для скорости частицы: $v = \frac{qBR}{m}$.

Подставим его в формулу для кинетической энергии.

$$\frac{mq^2 B^2 R^2}{2m^2} = qU \Rightarrow m = \frac{qB^2 R^2}{2U}.$$

Отношение масс частиц:

$$\frac{m_p}{m_e} = \left(\frac{R_p}{R_e} \right)^2 \Rightarrow \frac{R_p}{R_e} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}.$$

$$\text{Вычисление: } \frac{R_p}{R_e} = \sqrt{\frac{1,67 \cdot 10^{-27}}{9,11 \cdot 10^{-31}}} \approx 43.$$

Ответ: $R_p / R_e \approx 43$.

3. По длинному прямому проводу течет ток I_1 . В одной плоскости с проводом находится квадратная рамка с током I_2 . Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть рамку вокруг оси на 90° ? На 180° ? Сторона рамки r .

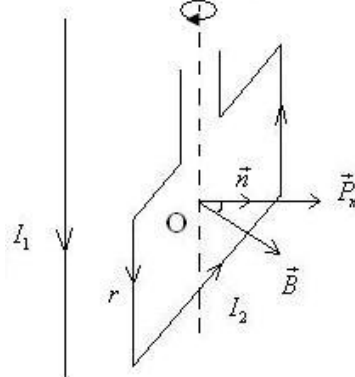
Дано:

I_1, I_2, r .

$\varphi_1 = 90^\circ, \varphi_2 = 180^\circ$.

$A_1 - ? \quad A_2 - ?$

Решение:



Ток I_1 , текущий по прямому проводу, создает в центре рамки (точка O) магнитное поле. Вектор магнитной индукции, направлен, «к нам», перпендикулярно плоскости рамки. Величина индукции магнитного поля, создаваемого прямым током I_1 определяется выражением:

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a},$$

где a – расстояние от прямого провода до рамки. Если первоначально рамка свободно покоится, то $\vec{B}$ параллелен вектору $\vec{P}_m$ – магнитному моменту рамки с током: $P_m = I_2 S = I_2 r^2$, где $S = r^2$ – площадь рамки. Во внешнем магнитном поле прямого тока, на рамку действует момент силы, величина которого равна: $M = P_m B \sin \varphi = I_2 r^2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} \sin \varphi$. Для поворота рамки вокруг осевой линии на угол $d\varphi$ необходимо совершить элементарную работу против сил магнитного поля:

$\delta A = M d\varphi = I_2 r^2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} \sin \varphi d\varphi$. Полная работа определится интегрированием:

$$A = \frac{\mu_0 I_1 I_2 r^2}{2\pi a} \int_0^{\varphi_i} \sin \varphi d\varphi = \frac{\mu_0 I_1 I_2 r^2}{2\pi a} (-\cos \varphi_i + \cos 0^\circ) = \frac{\mu_0 I_1 I_2 r^2}{2\pi a} (1 - \cos \varphi_i).$$

Если $\varphi_1 = 90^\circ$, $\cos 90^\circ = 0$, и $A_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 r^2}{2\pi a}$.

Если $\varphi_1 = 180^\circ$, $\cos 180^\circ = -1$, и $A_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 r^2}{\pi a}$.

Ответ: $A_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 r^2}{2\pi a}$, $A_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 r^2}{\pi a}$.

4. Квадратная, проволочная рамка массой 4 гр., по которой протекает ток 2 А., помещена в однородное магнитное поле индукцией 8 мТл, силовые линии которого перпендикулярны плоскости рамки. Рамка закреплена на вертикальном подвесе и может вращаться вокруг оси, лежащей в плоскости рамки и проходящей через середины противоположных сторон. Определите период малых колебаний рамки при отклонении из положения равновесия. Упругими свойствами подвеса пренебречь.

Дано:

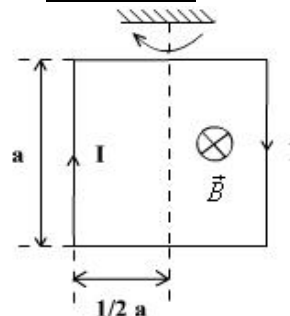
$$I = 2 \text{ А}$$

$$B = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

$$m = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$T = ?$$

Решение:



После отклонения рамки из положения равновесия пара сил, действующих на вертикально расположенные стороны рамки со стороны магнитного поля, создает вращательный момент. Этот момент силы Ампера стремится вернуть рамку в положение равновесия. Запишем основное уравнение динамики вращательного движения для рамки.

$$J \cdot \vec{\varepsilon} = \vec{M}, \text{ где}$$

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} - \text{угловое ускорение рамки, } \vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}] - \text{вращательный момент}$$

рамки с током, в магнитном поле, J – момент инерции рамки относительно оси вращения. В проекции на направление вектора $\vec{\varepsilon}$ уравнение движения примет вид:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -p_m B \sin \varphi, \text{ где}$$

$\varphi = \angle(\vec{p}_m, \vec{B})$ – угол между вектором магнитного момента рамки с током и вектором магнитной индукции. Знак «минус» в правой части уравнения показывает, что вектор углового ускорения направлен в сторону уменьшения угла φ . Если рассматривать малые колебания рамки, то $\sin \varphi \approx \varphi$ и уравнение можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{p_m B}{J} \varphi = 0.$$

Полученное уравнение является уравнением гармонических колебаний с собственной частотой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{p_m B}{J}},$$

которая связана с периодом колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{p_m B}}.$$

Учитывая выражение $p_m = I \cdot S$ для магнитного момента рамки, окончательно получим:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{I S B}}.$$

Размерность:

$$[T] = 1 \left[\sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Тл}}} \right] = 1 \left[\sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}}} \right] = 1[\text{с}].$$

Выражение для площади рамки: $S = a^2$, где a – длина стороны рамки.

Легко показать, что момент инерции рамки может быть вычислен по формуле: $J = \frac{1}{6} m a^2$. Тогда получим расчетную формулу для определения периода малых колебаний:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{6 \cdot I B}}.$$

Вычисление:

$$T = 2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}} = 1,28(\text{с}).$$

Ответ: $T = 1,28(\text{с})$

4. Соленоид диаметром 6 см. поворачивается в магнитном поле индукция которого 1Тл, на угол 180° за 0,05 с. Определить ЭДС индукции, в соленоиде, если число витков в нем равно 100.

Дано:

$$d = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad \alpha = 180^\circ, \quad \Delta t = 0,05 \text{ с}, \quad B = 1 \text{ Тл}, \quad N = 100.$$

$\mathcal{E}_i - ?$

Решение:

Магнитосцепление соленоида: $\psi = N\phi = NBS$. Согласно закону Фарадея при изменении магнитного потока возникает ЭДС индукции в соленоиде:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\phi}{dt} \approx -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}.$$

Изменение магнитного потока: $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$. Начальное значение магнитного потока

$$\phi_1 = BS = B \frac{\pi d^2}{4} \cos 0^\circ = B \frac{\pi d^2}{4}.$$

$\cos 0^\circ$ – косинус угла между вектором нормали к плоскостям витков и вектором магнитной индукции.

$$\phi_2 = B \frac{\pi d^2}{4} \cos 180^\circ = -B \frac{\pi d^2}{4}. \quad \text{Тогда изменение магнитного потока}$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -B \frac{\pi d^2}{2}. \quad \text{Отсюда находим ЭДС индукции в соленоиде:}$$

$$|\varepsilon_i| = \frac{\pi d^2 BN}{2\Delta t}.$$

Размерность:

$$[\varepsilon_i] = 1 \left[\frac{\text{м}^2 \text{В}}{\text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{м}} \right] = 1 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = 1[\text{В}].$$

Вычисление:

$$\varepsilon_i = \frac{3,14 \cdot 36 \cdot 10^{-4} \cdot 100}{2 \cdot 0,05} = 11,3(\text{В}).$$

Ответ: $\varepsilon_i = 11,3(\text{В})$.

5. Торойд с прямоугольным поперечным сечением ($h = 0,5 \text{ см}$, $R = 7 \text{ см}$, $r = 4 \text{ см}$) имеет 500 витков. Определить во сколько раз максимальная индукция магнитного поля внутри тороида больше минимальной если по его обмотке течет ток 3 А?

Дано:

$$h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

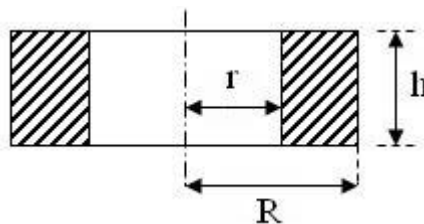
$$R = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$r = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$I = 3 \text{ А.}$$

$$N = 500.$$

Решение:



$$B_{\max} / B_{\min} - ?$$

Воспользуемся теоремой о циркуляции вектора магнитной индукции:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i.$$

Проведем вспомогательный контур L внутри тора радиусом r_0 : $r < r_0 < R$, в каждой точке которого вектор индукции совпадает с касательной в этой

точке. Вычислим циркуляцию вектора индукции вдоль этого контура:

$$\int_0^{2\pi r_0} B dl = 2\pi r_0 B.$$

Рассмотрим следующие возможные случаи:

1) Если контур лежит за пределами тороида, т.е. $r_0 > R$, то он не охватывает ни одного витка и поэтому по теореме о циркуляции $B = 0$.

2) Если контур лежит внутри тороида, то он охватывает N витков:

$$\sum_{i=1}^N I_i = N I, \Rightarrow 2\pi r_0 B = \mu \mu_0 N I, \Rightarrow B = \frac{\mu \mu_0 N I}{2\pi r_0}, \text{ где } \mu - \text{магнитная проницаемость}$$

материала сердечника тороида. Максимальной будет индукция если $r_0 = r$:

$$B_{\max} = \frac{\mu \mu_0 N I}{2\pi r}; \text{ минимальной, если } r_0 = R: B_{\min} = \frac{\mu \mu_0 N I}{2\pi R}. \text{ Их отношение:}$$

$$\frac{B_{\max}}{B_{\min}} = \frac{R}{r} = 1,75.$$

Ответ: Отношение индукций магнитного поля: $\frac{B_{\max}}{B_{\min}} = 1,75$.

6. Максимальная сила тока в колебательном контуре 0,1 А, максимальное напряжение на обкладках конденсатора 200 В. Определить частоту ω собственных колебаний контура, если энергия контура 0,2 мДж.

Дано:

$$I_0 = 0,1 \text{ А}, U_0 = 200 \text{ В}, W = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}.$$

$\omega - ?$

Решение:

В колебательном контуре (без затухания) максимальное значение энергии магнитного поля тока, в индуктивности, равно максимальной энергии электрического поля конденсатора:

$$W_E = \frac{CU_0^2}{2}, W_B = \frac{LI_0^2}{2} \Rightarrow \frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2} = W. \text{ Из полученных уравнений можно}$$

найти параметры колебательного контура – емкость и индуктивность:

$$C = \frac{2W}{U_0^2}, L = \frac{2W}{I_0^2}. \text{ Циклическая частота собственных незатухающих}$$

колебаний в контуре может быть выражена по формуле

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{I_0 U_0}{2W}.$$

Размерность:

$$[\omega] = 1 \left[\frac{A \cdot B}{\text{Дж}} \right] = 1 \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{Дж}} \right] = 1 [\text{с}^{-1}].$$

Вычисление:

$$\omega = \frac{0,1 \cdot 200}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Ответ: $\omega = 5 \cdot 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)}.$

7. Амплитуда колебаний напряженности магнитного поля электромагнитной волны $H_0 = 0,1 \frac{\text{А}}{\text{м}}$. Определите энергию, переносимую волной через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, за время $t = 1 \text{ с}$. Период волны $T \ll t$.

Дано:

$$H_0 = 0,1 \frac{\text{А}}{\text{м}}, \quad S = 1 \text{ м}^2, \quad t = 1 \text{ с}, \quad \varepsilon = 1, \quad \mu = 1, \quad T \ll t.$$

$W - ?$

Решение:

Плотность потока энергии электромагнитной волны определяется вектором Умова-Пойтинга:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}],$$

где $\vec{E}$, $\vec{H}$ – векторы напряженностей электрического и магнитного полей волны. Векторы $\vec{E} \perp \vec{H}$, и для величины вектора Умова-Пойтинга запишем: $S = E \cdot H$. Величины напряженностей полей изменяются по гармоническому закону, в одинаковой фазе и мгновенное значение плотности энергии:

$$\omega = |\vec{S}| = E_0 \sin(\omega t) \cdot H_0 \sin(\omega t) = E_0 H_0 \sin^2(\omega t).$$

Энергия, переносимая через площадку S перпендикулярно направлению распространения волны в единицу времени

$$\frac{dW}{dt} = \int_S \vec{\omega} \cdot d\vec{S} = \omega S = S E_0 H_0 \sin^2(\omega t).$$

Каждая компонента волны вносит половину энергии:

$$\frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H_0^2 \Rightarrow E_0 = H_0 \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}}. \quad \text{Тогда} \quad \frac{dW}{dt} = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}} H_0^2 S \sin^2(\omega t).$$

Энергия, переносимая волной за время t , равна:

$$W = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}} H_0^2 S \int_0^t \sin^2(\omega t') dt' = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}} H_0^2 S \left(\frac{t}{2} - \frac{\sin(2\omega t)}{4\omega} \right).$$

По условию $T \ll t$, поэтому $\frac{t}{2} \gg \frac{\sin(2\omega t)}{4\omega}$, и вторым слагаемым можно пренебречь. Тогда получаем окончательный результат: $W = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} H_0^2 S t$.

Размерность:

$$[W] = 1 \left[\sqrt{\frac{Гн}{Ф}} \cdot \frac{А^2}{М^2} \cdot М^2 \cdot с \right] = 1 \left[\sqrt{\frac{В^2}{А^2}} \cdot А^2 \cdot с \right] = 1 [А \cdot В \cdot с] = 1 [Вт \cdot с] = 1 [Дж].$$

Вычисление: $W = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2,56 \cdot 10^{-7}}{8,85 \cdot 10^{-12}}} (0,1)^2 \approx 1,88 (Дж).$

Ответ: $W = 1,88 (Дж).$

8. Уравнение плоской электромагнитной волны, распространяющейся в среде с магнитной проницаемостью равной 1, имеет вид $E(x,t) = 10 \sin(2\pi \cdot 10^8 t - 4,19x)$. Определите диэлектрическую проницаемость среды и длину волны.

Дано:

$$E(x,t) = 10 \sin(2\pi \cdot 10^8 t - 4,19x), \quad \mu = 1, \quad c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{М}{с}.$$

$$\varepsilon - ? \quad \lambda - ?$$

Решение:

Общее уравнение плоской монохроматической волны имеет вид:

$$E(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx),$$

где E_0 – амплитудное значение напряженности электрического поля волны, ω – циклическая частота, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $v = \frac{\omega}{k}$ – фазовая скорость волны в среде.

По условию $k = \frac{2\pi}{\lambda} = 4,19 (М^{-1}) \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k} = 1,5 (М).$

Фазовая скорость волны в среде связана с фазовой скоростью волны в вакууме соотношением:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \Rightarrow \varepsilon = \frac{1}{\mu} \left(\frac{c}{v} \right)^2 = \frac{1}{\mu} \left(\frac{ck}{\omega} \right).$$

Размерность:

$$[\varepsilon] = 1 \left[\frac{М/с \cdot М^{-1}}{с^{-1}} \right] = 1.$$

Вычисление:

$$\varepsilon = \frac{9 \cdot 10^{16} \cdot (4,19)^2}{(2\pi)^2 \cdot 10^{16}} = 4.$$

Ответ: диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 4$, длина волны $\lambda = 1,5 М$.

9. При разрядке цилиндрического конденсатора длиной 5 см. и внешним радиусом 0,5 см. в подводящих проводах течет ток проводимости 0,1 мкА. Определить плотность тока смещения в диэлектрике между обкладками конденсатора.

Дано:

$$l = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, r = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, I_{np} = 10^{-7} \text{ А}.$$

$$j_{cm} - ?$$

Решение:

Пусть заряд конденсатора $-q$.

Воспользуемся теоремой

Остроградского-Гаусса,

для вектора электрического

смещения: $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q$.

По условию поток вектора электрического смещения пронизывает боковую поверхность конденсатора и направлен нормально к ней, т.е.

$$D = D_n$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = D \int_0^l dS = D \cdot 2\pi r l, \quad D = \frac{q}{2\pi r l}.$$

Плотность тока смещения определяется выражением:

$$j_{cm} = \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r l} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{2\pi r l} I_{np}, \quad \text{т.к. сила тока проводимости по определению}$$

$$I_{np} = \frac{dq}{dt}.$$

Размерность:

$$[j] = 1 \left[\frac{A}{\text{м} \cdot \text{м}} \right] = 1 \left[\frac{A}{\text{м}^2} \right].$$

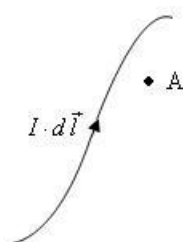
Вычисление:

$$j_{cm} = \frac{10^{-7}}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-2}} \approx 6,4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{A}{\text{м}^2} \right).$$

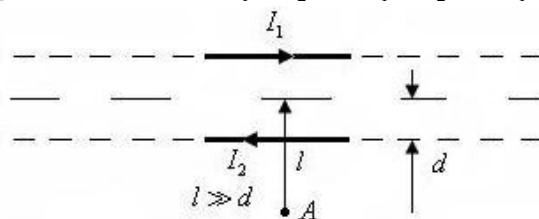
$$\text{Ответ: } j_{cm} \approx 6,4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{A}{\text{м}^2} \right)$$

3.4. Качественные задачи

3.4.1. Определите направление вектора $\vec{B}$ индукции магнитного поля, созданного элементом тока $I d\vec{l}$ в точке А.

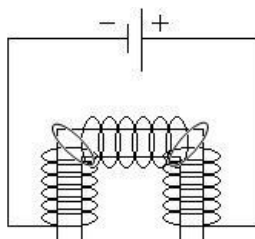


3.4.2. Определите направление результирующего вектора $\vec{B}$ индукции магнитного поля, созданного в точке A , двумя бесконечно длинными прямыми проводниками, при следующих соотношениях между силами токов, текущих по проводникам а) $I_1 = I_2$; б) $I_1 > I_2$; в) $I_1 < I_2$;



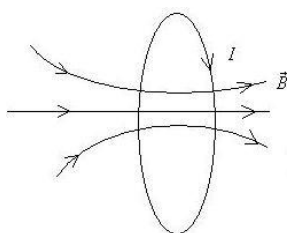
3.4.3. Единица измерения вектора магнитной индукции $\vec{B}$ называется Тесла. Определите её размерность.

3.4.4. Определите полюсы, образующиеся на концах электромагнита, показанного на рисунке.

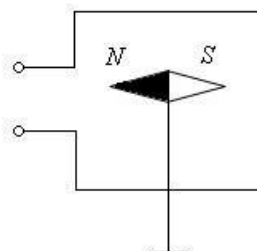


3.4.5. Почему показание механических часов будут неверными, если к ним поднести несколько раз магнит?

3.4.6. Контур с током, направленным по часовой стрелке расположен в неоднородном магнитном поле. Направление тока в контуре указано на рисунке. Линии индукции симметричны нормали к плоскости витка, проведенной через цент контура. Как будет двигаться контур?



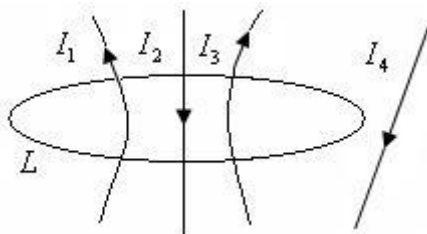
3.4.7. Определите направление тока и полюсы у источника постоянного тока, если магнитная стрелка, поднесенная к проводнику, отклоняется, как показано на рисунке



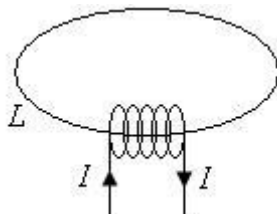
3.4.8. Кольцо из сверхпроводника, по которому течет ток, изгибают в виде восьмерки и складывают вдвое. Изменится ли циркуляция магнитного поля в центре нового кольца?

3.4.9. Чему равна циркуляция вектора $\vec{B}$ по контуру L в случаях, указанных на рисунках.

а)



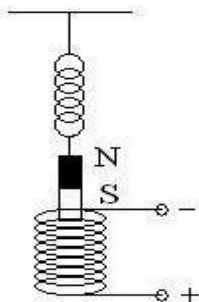
б)



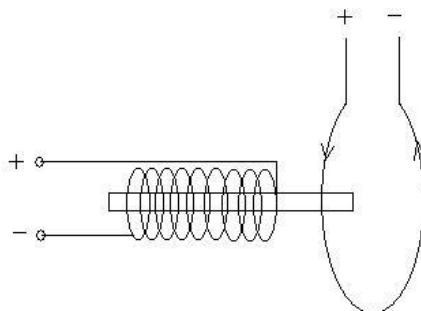
3.4.10. Виток гибкого проводника при пропускании тока по нему, стремится принять форму окружности. Почему?

3.4.11. Имея вольтметр постоянного тока и магнитную стрелку на острие, можно определить, в какой стороне двухпроводной линии постоянного тока находится источник. Как это сделать?

3.4.12. Что произойдет с постоянным полосовым магнитом, если в соленоиде ток направлен, как показано на рисунке?

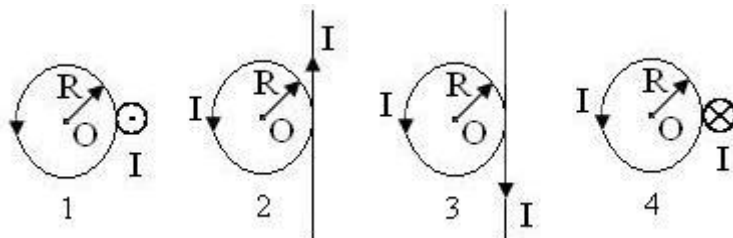
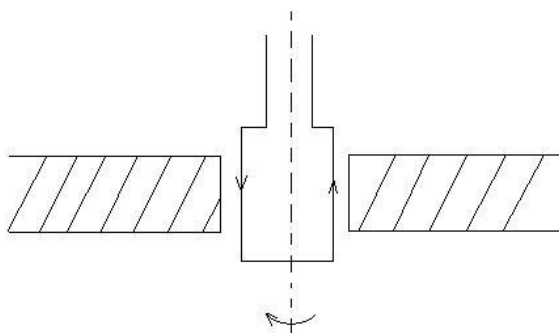


3.4.13. Как и почему будет двигаться виток с током относительно соленоида при указанных направлениях токов?

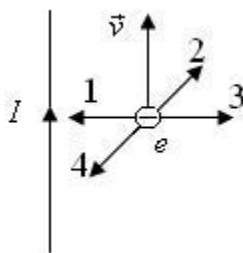


3.4.14. Каким должно быть расположение полюсов магнита, чтобы маленькая рамка с током поворачивалась по часовой стрелке? На какой угол она повернется?

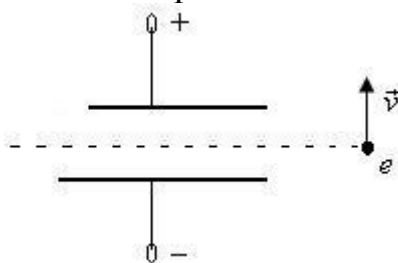
3.4.15. Магнитное поле создается круговым витком с током и бесконечным прямым проводником с током (рис.). Определите, в каком случае величина индукции магнитного поля в центре витка максимальна, в каком — минимальна.



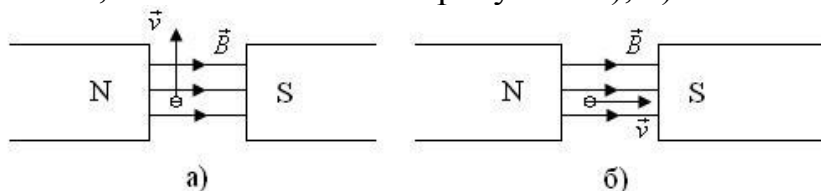
3.4.16. Электрон пролетает со скоростью $\vec{v}$ вдоль проводника с током I . Определите направление силы Лоренца, действующей на электрон в магнитном поле прямого тока.



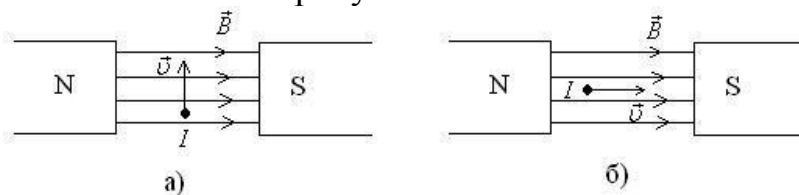
3.4.17. Электрон пролетает вблизи плоского конденсатора, величина заряда, на обкладках которого возрастает под действием внешнего источника. Покажите направление силы, действующей на электрон со стороны внешнего поля конденсатора.



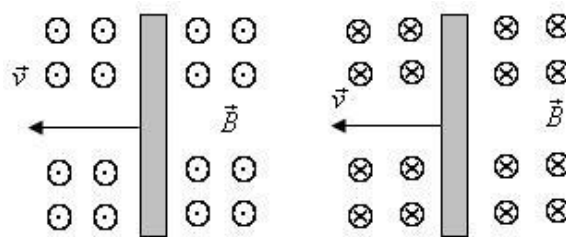
3.4.18. Будет ли возникать сила Лоренца, действующая на электрон, который движется, так как показано на рисунках а), б).



3.4.19. Будет ли возникать ЭДС индукции в проводниках, которые движутся, так как показано на рисунках?



3.4.20. Определите направление ЭДС индукции в проводниках, находящихся в однородных магнитных полях, изображенных на рисунке.



3.4.21. Прямоугольная рамка, двигаясь поступательно, равномерно: а) входит в однородное магнитное поле, б) движется в нем, в) выходит за границу поля. Нормаль к плоскости рамки направлена вдоль линий индукции. В каком случае в проводнике возникает ЭДС индукции? Почему?

3.4.22. Прямоугольная рамка вращается в однородном магнитном поле так, что ось вращения совпадает с направлением линий индукций. Возникает ли при этом ЭДС индукции? Ответ обоснуйте.

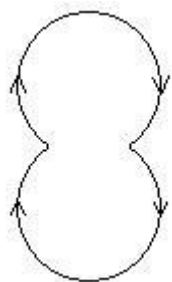
3.4.23. К медному кольцу, подвешенному в вертикальной плоскости, подносят по очереди два стальных стержня. В одном случае кольцо отталкивается от стержня. Почему?

3.4.24. Прямой постоянный магнит падает сквозь медный цилиндр. Можно ли считать, что движение происходит с ускорением свободного падения?

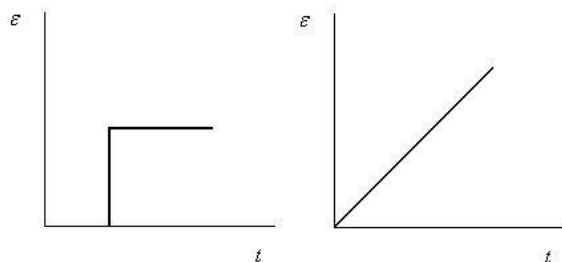
3.4.25. Проводник, сложенный вдвое, перемещается в однородном магнитном поле, пересекая линии индукции. Возникнет ли в проводнике ЭДС индукции? Что покажет гальванометр, если к нему присоединить концы движущегося проводника?

3.4.26. Почему при размыкании цепи, в которую включена катушка с сердечником, сильно искрит рубильник? Как устранить образование искр?

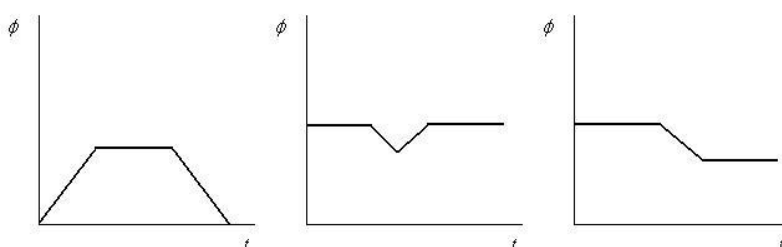
3.4.27. Кольцевой виток с током находится в переменном магнитном поле, индукция которого $B(t) = B_0 \sin(\omega t)$, перпендикулярна плоскости витка. Виток превратили в восьмерку, составленную из двух равных колец, не выводящие провод витка за пределы плоскости. Во сколько раз изменится амплитуда тока в витке?



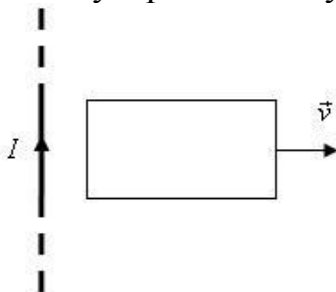
3.4.28. По графикам зависимости ЭДС индукции от времени, которая возникает в контуре, постройте зависимость магнитного потока ϕ от времени t .



3.4.29. По графикам зависимости магнитного потока ϕ , пронизывающего контур, от времени t , постройте зависимость ЭДС индукции от времени.

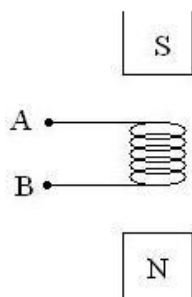


3.4.30. Прямоугольная проводящая рамка удаляется от прямолинейного проводника с током в перпендикулярном к нему направлении.



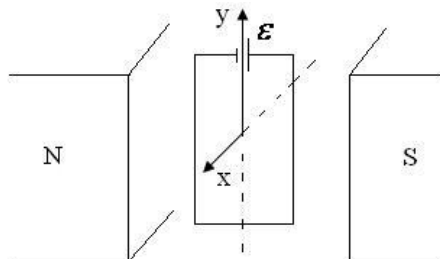
Определите направление индукционного тока, возникающего в прямоугольной рамке.

3.4.31. К катушке с противоположных сторон начинают приближаться два одинаковых постоянных полосовых магнита (полярность указана на рисунке)

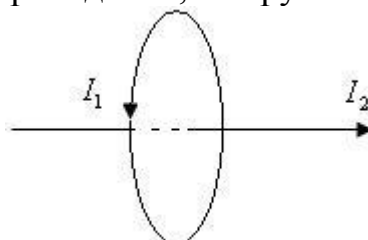


Будет ли в катушке возникать индукционный ток? Если индукционный ток возникает, то определите его направление.

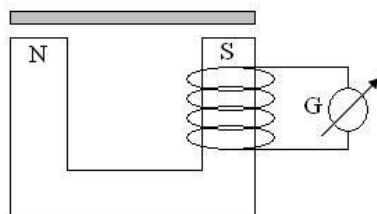
3.4.32. Прямоугольный контур замкнули на источник тока, ЭДС которого $\mathcal{E}$ и поместили в магнитное поле. Определите характер движения рамки в магнитном поле?



3.4.33. По оси кругового контура с током проходит бесконечно длинный прямой проводник с током. Как действует магнитное поле, создаваемое током в прямолинейном проводнике, на круговой контур?



3.4.34. Почему при замыкании полюсов подковообразного магнита, стрелка гальванометра отклоняется?



3.4.35. Какой факт выражен уравнением $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{cm} + I$? Выберите

правильный ответ:

- 1) магнитные поля создаваемые токами проводимости и смещения, являются потенциальными;
- 2) источником магнитного поля, являются движущиеся заряды и изменяющиеся со временем электрические поля;
- 3) существуют магнитные заряды, являющиеся источником магнитного поля.

3.4.36. Какой факт выражен уравнением $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$? Выберите правильный

ответ:

- 1) магнитное поле всегда потенциально;
- 2) существует фундаментальная частица – монополь Дирака, являющийся элементарным магнитным зарядом;
- 3) силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, т.е. магнитное поле не имеет источников и стоков.

3.4.37. Какой факт выражен уравнением $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q$? Выберите правильный

ответ:

- 1) силовые линии электрического поля всегда замкнуты, т.е. магнитное поле не имеет источников и стоков;
- 2) источником векторных линий электрического смещения являются связанные электрические заряды в диэлектрической среде;
- 3) источником электрического поля являются свободные и связанные электрические заряды.

3.4.38. Какой факт выражен уравнением $\oint_L \vec{E}_{\text{вихр}} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$? Выберите

правильный ответ:

- 1) источником электрического поля являются только покоящиеся электрические заряды;
- 2) источником вихревого электрического поля является переменное во времени магнитное поле;
- 3) источником вихревого магнитного поля является переменное во времени электрическое поле – ток смещения.

3.4.39. Как связаны между собой фазы колебаний векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в плоской, бегущей электромагнитной волне? Выберите правильный ответ:

- 1) совпадают;
- 2) сдвинуты на угол $+\pi/4$;
- 3) сдвинуты на угол $+\pi/2$;
- 4) сдвинуты на угол $-\pi/2$.

3.4.40. Закон сохранения электрического заряда может быть выражен в виде уравнения неразрывности в интегральной форме $\oint_S \vec{j} d\vec{S} = - \frac{d}{dt} \int_V \rho dV$, где $\vec{j}$ – вектор плотности тока проводимости, ρ – объемная плотность электрического заряда в объеме V пространства, ограниченного поверхностью S .

Докажите, что это уравнение является следствием системы уравнений Максвелла. Запишите уравнение неразрывности в дифференциальной форме.

3.5. Задачи для контрольных работ

Магнитное поле постоянного тока

3.5.1. По двум длинным прямолинейным проводникам текут в противоположных направлениях токи 20 и 30 А. Расстояние между проводниками 10 см. Определите напряженность магнитного поля в точке, расположенной на прямой линии, соединяющей проводники и отстоящей на 3 см от первого проводника.

3.5.2 Из проволоки длиной 1 м сделана квадратная рамка. По ней течет ток силой 10 А. Определите напряженность магнитного поля в центре рамки.

3.5.3 По двум прямолинейным проводникам, находящимся на расстоянии 10 см друг от друга в вакууме, текут соответственно токи 3 А и 2 А. Определите точки пространства, окружающего проводники, в которых магнитное поле отсутствует при одинаковом направлении токов.

3.5.4. Из проволоки длиной 3 м сделана рамка, в виде равностороннего треугольника. По ней течет ток 5 А. Определите напряженность магнитного поля в точке пересечения биссектрис этой треугольной рамки.

3.5.5. Определите напряженность магнитного поля в центре симметрии проволочного контура, представляющего собой правильный шестиугольник со стороной 1 м, если по нему течет ток силой 1 А.

3.5.6. Определите напряженность магнитного поля в центре полукольца, соединенного своими концами с двумя полу бесконечными параллельными проводниками. Расстояние между проводниками равняется 1 м и по ним течет ток силой 1 А. Все проводники лежат в одной плоскости.

3.5.7. Определите напряженность магнитного поля на расстоянии 1 м от бесконечно прямого провода, по которому течет ток силой 1 А.

3.5.8. По каждому из двух соосных колец радиусом $R = 10$ см, находящихся на расстоянии 20 см друг от друга, в одном и том же направлении течет ток силой 1 А. Определите напряженность магнитного поля на оси колец в точке, находящейся на равном расстоянии от каждого из них.

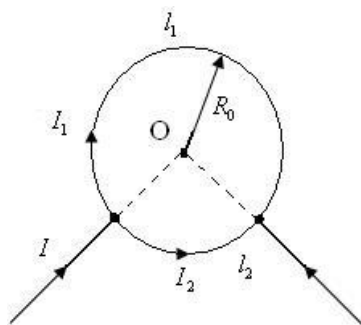
3.5.9. Напряженность магнитного поля в центре кругового витка с током 1000 А/м. Радиус витка равен 3 см. Определите напряженность магнитного поля на оси витка в точке, удаленной на расстоянии 4 см от его плоскости.

3.5.10. Бесконечно длинный провод образует круговой виток, касательный к проводу. По проводнику течет ток силой 5 А. Радиус витка 20 см. Определите напряженность поля в центре образованного кольца.

3.5.11. По проволочной рамке, имеющей форму правильного шестиугольника, течет ток силой 2 А. Напряженность магнитного поля в центре рамки $H = 33$ А/м. Определите длину проволоки, из которой сделана рамка.

3.5.12. Бесконечно длинный провод образует круговой виток, касательный к проводу. По проводу течет ток $I = 5$ А. Определите радиус витка, если напряженность магнитного поля в центре витка $H = 41$ А/м.

3.5.13. К тонкому однородному проволочному кольцу, радиуса R_0 , подводят ток I . Подводящие провода, расположенные радиально, делят кольцо на две дуги, длины которых l_1 и l_2 (рис.). Определите индукцию магнитного поля в центре кольца.

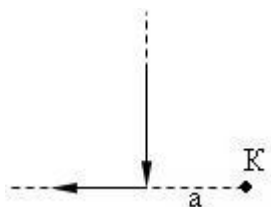


3.5.14. По трем бесконечно длинным прямым проводникам, расположенным в одной плоскости параллельно друг другу на расстоянии 5 см, текут токи $I_1 = I_2$ и $I_3 = -(I_1 - I_2)$. Определите положение прямой, на которой напряженность поля, создаваемая токами, равна нулю.

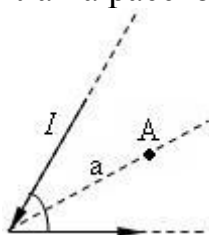
3.5.15. По длинному проводу сверху вниз течет ток силой 10 А. Определите точку вблизи середины провода, в которой вектор напряженности магнитного поля, получающегося от сложения поля тока и земного поля, имеет вертикальное направление. Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли 16 А/м.

3.5.16. По двум бесконечно длинным проводам, расположенным параллельно друг другу на расстоянии 8 см, в одном направлении текут токи 15 А и 20 А. Определите напряженность магнитного поля в точке, отстоящей от первого провода на расстоянии 4 см, а от второго на расстоянии 10 см.

3.5.17. По длинному прямому проводу, согнутому под прямым углом, течет ток силой 18 А. Определите напряженность поля в точке К, если величина a равняется 4 см.



3.5.18 Ток силой 25 А течет по длинному прямому проводу, согнутому под углом 60° . Определите напряженность магнитного поля в точке А, находящейся на биссектрисе угла на расстоянии $a=60$ см от его вершины.



3.5.19. Определите напряженность магнитного поля в центре прямоугольного контура, по которому течет ток силой 10 А. Стороны контура равны соответственно 20 см и 16 см.

3.5.20. Определите напряженность магнитного поля в вершине правильного тетраэдра. Магнитное поле создается током 7 А, текущему по замкнутому контуру в форме правильного треугольника со стороной 10 см. Для тетраэдра этот треугольник служит основанием.

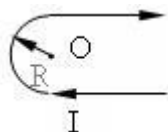
3.5.21. По проводнику, согнутому в форме кольца радиусом 8 см, течет ток силой 10 А. Определите напряженность магнитного поля в центре кольца.

3.5.22. Четыре длинных прямых параллельных проводника проходят через вершины квадрата со стороной 20 см, перпендикулярно его плоскости. По каждому из них течет ток силой 8 А. При этом по трем проводникам ток течет в одном направлении, а по четвертому в противоположном. Определите индукцию магнитного поля в центре квадрата.

3.5.23. Длинный прямой провод имеет виток радиуса 10 см. По проводнику течет ток 5 А. Определите индукцию магнитного поля в центре витка и в точке, лежащей на его оси, на расстоянии 20 см от центра.

3.5.24. Определите индукцию магнитного поля в центре проводящего контура в форме прямоугольника с диагональю 12 см. Угол между диагоналями прямоугольника равен 30° . Ток в контуре 4 А.

3.5.25. Определите индукцию магнитного поля в точке О, если проводник с током I имеет вид, указанный на рисунке. Радиус изогнутой части R , а прямолинейные участки проводника - бесконечной длины.



3.5.26. Между полюсами электромагнита в горизонтальном магнитном поле находится проводник длиной 0,5 м, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции поля. Определите ток, текущий по проводнику, который висит горизонтально, не падая. Индукция магнитного поля 0,01 Тл. Масса проводника 1 кг.

3.5.27. Между полюсами магнита на двух тонких проволочках подвешен горизонтально линейный проводник массой 1 кг и длиной 15 см. Индукция магнитного поля магнита направлена вертикально вверх и равна 0,25 Тл. На какой угол от вертикали отклонятся проволочки, если по проводнику пропустить ток 5 А?

3.5.28. По кольцу диаметром 40 мм, выполненному из медной проволоки сечением 1 мм², течет ток 0,1 А. Кольцо находится в однородном магнитном поле и его ось совпадает с направлением поля. Определите максимальное значение индукции магнитного поля, при котором кольцо не разорвется. Медь выдерживает нагрузку на разрыв $2,3 \cdot 10^8$ Н/м².

3.5.29. По тонкому кольцу массой m и радиусом R течет ток I . Кольцо расположено горизонтально в вертикальном магнитном поле и находится в равновесии. Определите градиент dB/dr магнитного поля в области кольца.

3.5.30. По соленоиду длиной 0,5 м, имеющему 500 витков, течет ток силой 10 А. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции вдоль замкнутого контура, совпадающего с одной из линий магнитной индукции.

3.5.31. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции вдоль контура, который охватывает токи 10 А и 12 А, текущие в одном направлении, и ток 18 А, текущий в противоположном направлении.

3.5.32. По проводнику течет ток плотностью 100 А/м^2 . Определите циркуляцию вектора напряженности вдоль окружности радиусом 3 мм, которая расположена внутри проводника и ориентирована так, что ее плоскость составляет угол 30° с вектором плотности тока.

3.5.33. По обмотке тороида с диаметром средней линии 20 см течет ток 3 А. Сечение тороида - круг радиусом 3 см. Определите максимальное и минимальное значение магнитной индукции в тороиде, если число витков на единицу длины равняется 1000.

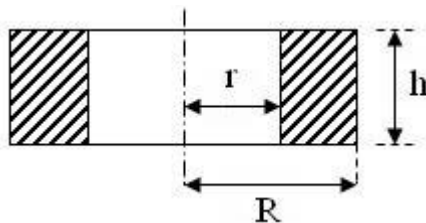
3.5.34. Определите индукцию и напряженность магнитного поля на оси тороида, по обмотке которого, содержащей 500 витков, течет ток силой 3 А. Внешний диаметр тороида 50 см, внутренний – 40 см. Сердечник отсутствует.

3.5.35. Соленоид длиной 0,75 м и сечением 20 см^2 имеет 1500 витков. Вычислите потокосцепление, если по соленоиду течет ток силой 8 А.

3.5.36. По соленоиду, число витков на единицу длины которого 800 м^{-1} , течет ток 5 А. Плоскость витков соленоида составляет угол 30° к оси соленоида. Определите индукцию магнитного поля внутри соленоида.

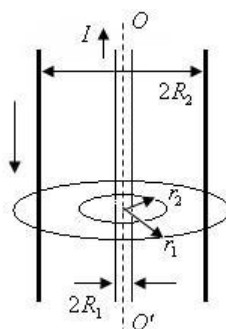
3.5.37. По длинному соленоиду, имеющему 3000 витков на единицу длины, течет ток 0,15 А. Ось соленоида установлена горизонтально в плоскости магнитного меридиана. Период колебаний маленькой магнитной стрелки, помещенной на упругом подвесе внутри соленоида вдоль его оси равен 0,2 с. Если ток в соленоиде отключить, то период колебаний стрелки станет равным 0,4 с. Определите по этим данным горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

3.5.38. Тороид с прямоугольным поперечным сечением ($h = 0.5 \text{ см}$, $R = 7 \text{ см}$, $r = 4 \text{ см}$) имеет 500 витков (см. рис.). Определите, во сколько раз максимальная индукция магнитного поля внутри тороида больше минимальной, если по его виткам течет ток 3 А.



3.5.39. Определите магнитный поток в соленоиде при силе тока 5 А. Сечение соленоида прямоугольной формы и имеет те же размеры, что и тороид предыдущей задачи.

3.5.40. Двухпроводная система (токи в ней текут в противоположных направлениях) состоит из коаксиально расположенных проводника ($R_1=2$ мм) и тонкостенной цилиндрической трубы ($R_2=2$ см), по которым течет ток (рис.). Определите индукцию магнитного поля в точках, лежащих на расстояниях $r_1=3$ см и $r_2=1$ см от оси симметрии системы, если ток $I=10$ А. Систему считать бесконечно длинной.



3.5.41. На немагнитный сердечник тороида небольшого поперечного сечения намотано $3 \cdot 10^3$ витков провода, по которому течет ток силой 5 А. Определите индукцию магнитного поля внутри тороида, если его радиус 0,2 м.

3.5.42. По медному проводу радиусом 10 мм течет ток 200 А. Определите напряженность магнитного поля внутри провода в точке, отстоящей на расстоянии 4 мм от оси провода.

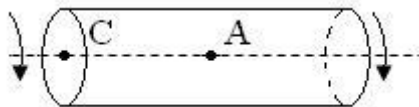
3.5.43. Определите магнитный поток через прямоугольное поперечное сечение тороида, если ток в его обмотке 2 А, число витков равняется 1000, толщина (высота) тора 10 см, а отношение внешнего диаметра к внутреннему равно 2.

3.5.44. Определите магнитный момент тонкого кругового витка с током, если радиус витка 80 мм, индукция магнитного поля в его центре 6 мкТл.

3.5.45. Вычислите магнитный момент тонкого проводника с током в 1 А, плотно намотанного на половину тора. Диаметр сечения тора 4 см. Число витков равняется 200.

3.5.46. Длинный цилиндр из диэлектрика (см. рис.), по поверхности которого равномерно распределен положительный заряд с линейной

плотностью $\tau = 10$ мкКл/м, вращается вокруг оси, совершая $n = 1 \cdot 10^2$ об/с. Определите индукцию магнитного поля в двух точках: в середине оси цилиндра и в центре одного из оснований (точка A и точка C).



3.5.47. По двум прямолинейным длинным проводникам по 0,5 м каждый, текут одинаковые токи в одном направлении. Определите величину этих токов, если расстояние между проводниками 2 см, а сила их взаимодействия равняется 10^{-2} Н.

3.5.48. По трем прямым параллельным проводникам, находящихся на одинаковом расстоянии в 8 см друг от друга, текут токи по 10 А. При этом по двум проводникам токи текут в одном направлении. Вычислите силу, действующую на единицу длины каждого проводника.

3.5.49. Шины генератора представляют собой параллельные медные полосы длиной 2 м, находящихся на расстоянии 40 см друг от друга. При коротком замыкании по ним может пройти ток до 10000 А. С какой силой взаимодействуют шины? Изменится ли ответ, если шины сделать железными? ($\rho_{Cu} = 1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\rho_{Fe} = 9,0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.)

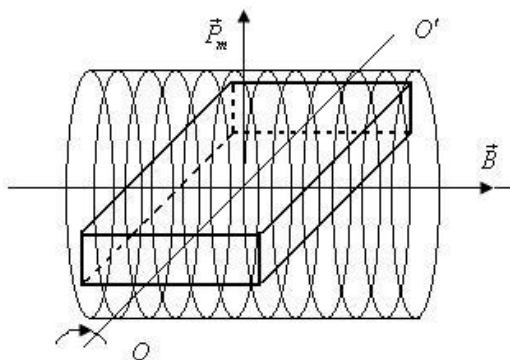
3.5.50. Соленоид длиной 70 см имеет три слоя обмотки по 150 витков в каждом слое. Определите ток, питающий соленоид, если напряженность поля внутри соленоида равняется $6 \cdot 10^3$ А/м.

3.5.51. Квадратная рамка, выполненная из тонкой проволоки, подвешена на неупругой нити. Определите период колебаний рамки в магнитной поле индукции 0,02 Тл, если по ней пропущен ток 3 А. Масса рамки 1 г. Сторона рамки 20 см².

3.5.52. Рамка гальванометра размером $4 \cdot 1,5$ см² содержит 200 витков и находится в магнитном поле индукции 0,05 Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции. Вычислите вращающий момент, действующий на рамку, если по ней течет ток 0,2 А.

3.5.53. В центре длинного соленоида с числом витков $N_1 = 5000$ помещена рамка с $N_2 = 50$ витками провода, площадью $S = 4$ см² каждый. Рамка вращается вокруг оси OO' (см. рис.), перпендикулярной оси соленоида, и удерживается в равновесии пружиной, при этом ее плоскость параллельна оси соленоида. Рамка и соленоид соединяются последовательно и по ним

пропускают ток, в результате чего рамка поворачивается на угол $\varphi = 60^\circ$. Определите силу тока I , если жесткость пружины $6 \cdot 10^{-5}$ Н·м/рад.



3.5.54. Диаметр витков соленоида в 3 раза больше длины его оси. Число витков, приходящихся на 1 см, равняется 300. Определите индукцию магнитного поля внутри соленоида и в центре одного из его оснований, если по обмотке соленоида течет ток 1 А.

3.5.55. Определите силу взаимодействия двух катушек с магнитными моментами $5 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$ и $8 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$, если их оси лежат на одной прямой, а расстояние между катушками значительно превышает их линейные размеры и равно 25 см.

3.5.56. Железное кольцо имеет разрез. Величина воздушного зазора равняется 8 мм. Длина средней линии кольца 1,2 м. Определите число витков, содержащихся в обмотке кольца, если при силе тока 5 А индукция магнитного поля в воздушном зазоре составляет 0,6 Тл. Рассеиванием магнитного потока в зазоре можно пренебречь.

3.5.57. Вычислите циркуляцию вектора магнитной индукции вдоль контура, охватывающего токи 3 А и 5 А, текущие в одном направлении, и токи 4 А и 8 А, текущие в противоположном направлении.

3.5.58. Прямолинейный проводник длиной 1 м, по которому течет ток 5 А, перемещается со скоростью 5 см/с в магнитном поле с напряженностью $1,6 \cdot 10^3$ А/м перпендикулярно силовым линиям. Определите работу по перемещению проводника в течение 1 мин.

3.5.59. Вычислите работу необходимую для поворота рамки с током 5 А и площадью 600 см^2 в однородном внешнем магнитном поле, индукция которого 1 Тл из положения рамки вдоль поля до положения, перпендикулярного полю.

3.5.60. Два параллельных прямолинейных проводника находятся на расстоянии 10 см друг от друга. По проводникам текут токи соответственно силой 20 А и 30 А в одном направлении. Какую работу (на единицу длины проводника) надо совершить, чтобы раздвинуть эти проводники до расстояния 20 см?

3.5.61. Под действием однородного магнитного поля перпендикулярно линиям индукции начал перемещаться прямой проводник массой $m=2$ кг, по которому течет ток $I=10$ А. Определите магнитный поток, пересекающий проводник, к моменту времени, когда его скорость станет равной $v = 31,6$ м/с.

3.5.62. Два прямолинейных длинных параллельных проводника находятся на некотором расстоянии друг от друга. По проводникам текут токи, равные по величине и одинаковые по направлению. Определите силу тока, текущего по каждому из проводников, если известно, что для того, чтобы раздвинуть эти проводники на вдвое большее расстояние, пришлось совершить работу $6 \cdot 10^{-5}$ Дж на единицу длины проводника.

3.5.63. По длинному прямому проводу течет ток J_1 . В одной плоскости с проводом находится квадратная рамка со стороной a и током J_2 . Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть рамку вокруг оси на 90° на 180° ?

3.5.64. В однородном магнитном поле с индукцией 0,05 Тл находится прямой проводник с током 3 А и длиной 15 см, расположенный перпендикулярно линиям индукции. Определите работу поля по перемещению проводника на расстояние 8 см.

3.5.65. Плоский контур площадью 500 см^2 находится в однородном магнитном поле индукции 0,02 Тл. Плоскость контура перпендикулярна линиям индукции поля. Определите работу внешних сил по перемещению контура с током 8 А в область пространства, где магнитное поле отсутствует.

3.5.66. По квадратному контуру со стороной 15 см течет ток 10 А. Плоскость контура составляет угол 30° с линиями индукции магнитного поля, величина которого 0,08 Тл. Определите работу, необходимую для удаления контура за пределы поля.

3.5.67. Медный диск ($\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) толщиной 5 мм и радиусом 50 мм наэлектризован трением так, что поверхностная плотность заряда равна $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$. Диск вращается с угловой скоростью $\omega = 1,6 \text{ с}^{-1}$.

Определите напряженность магнитного поля в центре диска, магнитный момент и отношение магнитного момента к моменту импульса диска.

3.5.68. Виток провода диаметром 30 см свободно установился в однородном магнитном поле, индукция которого 0,06 Тл. Определите работу, которую необходимо совершить, чтобы повернуть виток на угол $\pi/2$ и на угол 2π , если по нему течет ток 5 А.

3.5.69. Ось катушки, содержащей 800 витков диаметром 10 см, расположена параллельно магнитному меридиану Земли. Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли равняется 16 А/м. Определите работу, которую нужно совершить, чтобы повернуть катушку на 180° . Ток в катушке 1 А.

3.5.70. Из проволоки длиной 40 см сделан квадратный контур, по которому течет ток в 2 А. Определите работу, которую нужно совершить, чтобы повернуть этот контур в магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл на 45° от положения равновесия.

3.5.71. Из проволоки длиной 20 см сделан круговой контур. По контуру течет ток в 1 А. Определите работу, которую нужно совершить, чтобы повернуть контур в магнитном поле $B = 0,1$ Тл от положения равновесия на 30 градусов.

3.5.72. Прямолинейный проводник длиной 40 см находится в магнитном поле с индукцией 0,5 Тл под углом 60° к линиям индукции. Определите работу, которую совершает магнитное поле, если по проводнику течет ток 10 А, и он переместился на 50 см в магнитном поле.

3.5.73. В магнитном поле электромагнита индукции 0,2 Тл находится прямоугольная рамка размером 24 см^2 , по которой течет ток 3 А. Определите работу, которую необходимо совершить, чтобы повернуть рамку из положения равновесия на 60° .

3.5.74. Два прямолинейных проводника параллельны друг другу. По ним текут токи в противоположных направлениях соответственно 5 А и 8 А. Проводники находятся на расстоянии 10 см друг от друга. Определите работу на единицу длины проводника, необходимую для того, чтобы раздвинуть их до расстояния 25 см друг от друга.

3.5.75. Из проводящей проволоки длиной 60 см сделали круговой контур, по которому пропустили ток 0,5 А и поместили в магнитное поле индукции 0,25 Тл. Определите работу, необходимую для поворота контура на 45° в магнитном поле.

3.5.76. Определите мощность, необходимую для поворота рамки с током в 3 А и площадью 100 см^2 в однородном магнитном поле индукции 0,4 Тл за 0,25 с из положения вдоль поля до положения перпендикулярного полю.

3.5.77. Квадратная рамка с током 1 А расположена в одной плоскости с длинным прямым проводником с током 6 А. Сторона рамки 4 см, а проходящая через середины противоположных сторон ось рамки параллельна проводу и отстоит от него на расстоянии в 2 раза больше стороны рамки. Определите момент сил, действующих на рамку, и механическую работу, которую нужно совершить, чтобы повернуть рамку вокруг оси на 180° .

3.5.78. Квадратная проводящая рамка со стороной a подвешена в магнитное поле индукции B на упругой нити. Постоянная кручения нити C . Плоскость рамки параллельна магнитным линиям. Определите, какой силы ток следует пропустить по рамке, чтобы она повернулась на угол φ .

3.5.79.. Медный провод сечением $3,5 \text{ мм}^2$ согнут в форме квадрата, и может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, проходящей через одну из его сторон. Определите индукцию вертикального магнитного поля, если при пропускании тока 10 А рамка повернулась на 30° .

3.5.80. Пружина длиной L и радиусом r ($r \ll L$) имеет N витков. Коэффициент упругости пружины k и к ней подвешен груз массой m . Определите смещение груза, если по пружине пропустить ток I .

3.5.81. Квадратная рамка с током расположена так, что может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, совпадающей с одной из сторон. Рамка находится в вертикальном магнитном поле с индукцией B . Угол наклона рамки к горизонту α , масса m , длина стороны a . Определите ток в рамке и ее магнитный момент.

3.5.82. Катушка с током J стоит вертикально на непроводящей плоскости. Масса катушки m , радиус R , число витков N . Определите индукцию однородного магнитного поля, направленного горизонтально, под действием которого катушка опрокидывается.

3.5.83. Проводящее кольцо с током J поместили в магнитное поле перпендикулярное его плоскости. Радиус кольца R и оно выдерживает на разрыв нагрузку F . Определите индукцию магнитного поля, при котором кольцо разорвется. Магнитным полем тока J пренебречь.

3.5.84. В центре длинного соленоида расположена маленькая плоская рамка из 30 витков площадью 10^{-4} м^2 каждый. По рамке течет ток силой 1 А того же направления, что и ток в соленоиде. Ток в соленоиде 4 А, плотность намотки 5000 витков/м. Какую работу против сил магнитного поля нужно совершить, чтобы переместить рамку в середину основания соленоида? Плоскость рамки перпендикулярна оси соленоида.

3.5.85. Определите мощность, необходимую для перемещения проводника длиной 30 см со скоростью 8 м/с в поле индукции 0,1 Тл. По проводнику течет ток 12 А, и он движется перпендикулярно силовым линиям поля.

Движение заряженных частиц в магнитных и электрических полях

3.5.86. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 1000 В, влетает в однородное магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны его скорости. Индукция магнитного поля равна $1,19 \cdot 10^{-3}$ Тл. Определите радиус кривизны траектории электрона.

3.5.87. Заряженная частица движется в магнитном поле по окружности со скоростью 10^6 м/с. Индукция магнитного поля 0,3 Тл. Радиус окружности 4 см. Определите заряд частицы, если известно, что ее энергия 12 кэВ.

3.5.88. Силовые линии магнитного поля, индукция которого 0,05 Тл, перпендикулярны силовым линиям электрического поля, напряженность которого 100 В/м. Скорость пучка электронов перпендикулярна плоскости расположения векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Определите скорость электронов, если при одновременном действии обоих полей пучок электронов не испытывает отклонения.

3.5.89. Электрон влетает в плоский воздушный конденсатор, расположенный горизонтально, параллельно его пластинам со скоростью 10^7 м/с. Длина конденсатора 5 см, напряженность электрического поля 100 В/см.

При вылете из конденсатора электрон попадает в магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны силовым линиям электрического поля. Индукция магнитного поля 10^{-2} Тл. Определите радиус и шаг винтовой траектории электрона в магнитном поле.

3.5.90. Протон влетает в магнитное поле под углом 30 градусов к направлению поля и движется по спирали, радиус которой равен 1,5 см. Индукция магнитного поля 0,1 Тл. Определите кинетическую энергию протона.

3.5.91. Электрон влетает в магнитное поле с индукцией $B = 10^{-3}$ Тл под углом

$\alpha = 30^\circ$ к его силовым линиям со скоростью $V = 3 \cdot 10^7$ м/с. Определите шаг спирали, по которой будет двигаться электрон.

3.5.92. Определите период обращения протона в магнитном поле с индукцией

$B = 6,55 \cdot 10^{-4}$ Тл.

3.5.93. Два электрона движутся с одинаковыми по модулю скоростями v в однородном магнитном поле. В какой-то момент расстояние между ними равняется $2R$, а скорости электронов перпендикулярны магнитному полю и прямой, соединяющей электроны. При каком значении индукции магнитного поля расстояние между электронами останется неизменным?

3.5.94. Радиус орбиты электронов, ускоряемых бетатроном, $R=300$ мм. Среднее по площади орбиты значение магнитной индукции $B_{\text{ср}}$ поля, создаваемого магнитом бетатрона, изменяясь со временем по линейному закону, возрастает от нуля до $B_1=0,2$ Тл. Определите скорость, приобретенную за это время электронами.

3.5.95. В однородное магнитное поле влетает α - частица с энергией 600 эВ. Определите силу, действующую на нее, если индукция магнитного поля равна 0,2 Тл и перпендикулярна направлению скорости частицы.

3.5.96. Поток протонов, ускоренных разностью потенциалов $2 \cdot 10^6$ В, влетает в однородное магнитное поле с напряженностью $1,6 \cdot 10^6$ А/м. Скорость частиц перпендикулярна направлению магнитного поля. Определите силу, действующую на каждый протон.

3.5.97. Протон, имеющий скорость $v = 10^4$ м/с, влетает в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,01$ Тл.

Вектор скорости протона направлен под углом $\alpha = 60^\circ$ к линиям индукции. Определите траекторию движения протона, путь, пройденный им по траектории за время $t_1 = 10$ мкс.

3.5.98. Из точки А, лежащей на оси прямого соленоида, вылетает электрон со скоростью v под углом α к его оси. Индукция магнитного поля B . Определите расстояние от оси до точки попадания электрона на экран, расположенный перпендикулярно оси на расстоянии L от точки А.

3.5.99. В длинной вакуумной трубке, вдоль ее оси, движутся электроны со скоростью 10^5 м/с, образуя цилиндрический пучок диаметром 60 см. Ток

пучка равен 10^4 А. Определите величину и направление силы, действующей на каждый электрон на боковой поверхности пучка.

3.5.100. Спираль, по которой движется протон в однородном магнитном поле индукции B , имеет диаметр d и шаг h . Определите скорость протона.

3.5.101. α – частица движется в однородном магнитном поле индукции 1,5 Тл по окружности радиусом 50 см в плоскости, направленной под углом 45° к силовым линиям поля. Определите скорость и кинетическую энергию частицы.

3.5.102. В пространстве создано однородное электрическое поле напряженностью 1 Мв/м и однородное магнитное поле индукции 10^{-2} Тл. Вектор напряженности электрического поля перпендикулярен вектору индукции магнитного поля. Перпендикулярно обоим векторам движется, не отклоняясь, пучок μ^+ – мезонов. Определите скорость частиц.

3.5.103. Как относятся радиусы траекторий двух электронов с кинетическими энергиями W_1 и W_2 , если однородное магнитное поле перпендикулярно их скоростям?

3.5.104. С помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле индукции B , наблюдают упругое рассеивание α – частиц на ядрах дейтерия. Определите начальную энергию α – частицы, если радиус кривизны начальных участков траектории ядра и α – частицы после рассеивания равен R . Обе траектории лежат в плоскости, перпендикулярной индукции магнитного поля.

3.5.105. Протон влетает со скоростью 10^4 м/с в область пространства, в которой создано электрическое поле напряженностью 200 В/м и магнитное поле индукции 0,04 Тл, совпадающие по направлению.

Определите ускорение протона в начальный момент движения в полях, если направление скорости 1) совпадает с направлением полей; 2) перпендикулярно ему.

3.5.106. Для получения высоких температур, необходимых для осуществления термоядерной реакции, используют магнитную термоизоляцию. Уход частиц из зоны высокой температуры предотвращается магнитным полем. Определите ток в столбе газового разряда радиусом 3 см, необходимого для того, чтобы электроны, имеющие среднюю скорость хаотического движения при температуре 10^6 К, не могли удалиться от поверхности столба на расстояние более чем 0,3 мм.

3.5.107. Алюминиевая пластина сечением $X \times Y$ помещена в магнитное поле индукции 0,6 Тл, перпендикулярной ребру Y и направлению тока в 4 А. Определите возникающую поперечную разность потенциалов, если толщина пластины $X = 0,2$ мм, а концентрация электронов проводимости равна концентрации атомов.

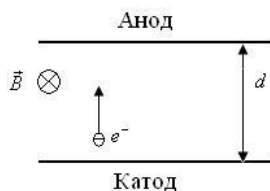
3.5.108. При изучении эффекта Холла в натрии напряженность поперечного электрического поля оказалась равной $5 \cdot 10^{-3}$ В/м, а индукция магнитного поля 1 Тл при плотности тока 200 А/см². Определите концентрацию электронов проводимости и ее отношение к концентрации атомов в данном проводнике.

3.5.109. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов U , влетает в однородное магнитное поле созданное соленоидом длиной L с числом витков N , под углом α к направлению индукции поля. Определите минимальную силу тока в соленоиде, при которой электрон пересечет ось соленоида дважды.

3.5.110. Однородное электрическое (5 В/см) и магнитное поля (0,2Тл) взаимно перпендикулярны. Определите величину и направление скорости электрона, чтобы его траектория была прямолинейна.

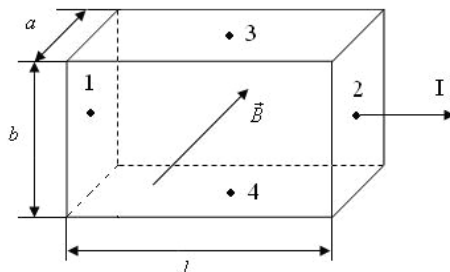
3.5.111. Заряженная частица массой m влетает в однородное магнитное поле индукцией B со скоростью v под углом α к магнитным линиям и начинает двигаться по винтовой линии с шагом x . Определите заряд частицы q

3.5.112. На плоские электроды - анод и катод - расстояние между которыми d , подано электрическое напряжение (см. рис). Система находится в магнитном поле, вектор индукции $\vec{B}$ которого параллелен плоскости электродов. Определите, при каком значении напряжения электроны достигнут поверхности анода, если $B = 0,1$ Тл, $d = 2$ см.



3.5.113. Медная пластинка имеет длину $l = 60$ мм, ширину $b = 20$ мм, толщину $a = 1$ мм. (см. рис) При пропускании вдоль пластинки тока $I = 10$ А между точками пластины 1 и 2 возникает разность потенциалов

$U_{12} = 0,51 \text{ мВ}$, разность потенциалов $U_{34} = 0$. Не выключая тока, создают перпендикулярно направленное к пластине однородное магнитное поле, индукция которого $B = 0,1 \text{ Тл}$. Между точками пластины 3 и 4 в этом случае возникает разность потенциалов $U_{34} = 0,55 \cdot 10^{-7} \text{ В}$. Определите концентрацию свободных электронов в меди и их подвижность.

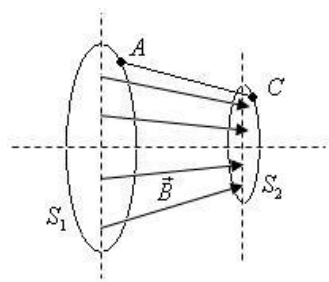


3.5.114. В циклотроне для тяжелых ионов в Дубне ионы неона разгоняются до энергии 100 МэВ. Диаметр дуантов 310 см, индукция магнитного поля в зазоре дуантов 1,1 Тл, ускоряющая разность потенциалов 300 кВ. Определите кратность ионизации атома неона, полное число оборотов его в процессе ускорения и частоту изменения полярности ускоряющего электрического поля.

3.5.115. В рамках планетарной модели атома Резерфорда-Бора, электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите, радиус которой $r = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ м}$. Определите величину индукции магнитного поля электронного тока, в центре орбиты, если скорость движения электрона по круговой орбите $v \approx 1,38 \cdot 10^7 \text{ м/с}$.

3.5.116. Принимая, что электрон в атоме водорода движется по круговой орбите, определите отношение $\frac{|\vec{p}_m|}{|\vec{L}_e|}$ магнитного момента электронного тока к моменту импульса орбитального движения электрона.

3.5.117. Докажите, что изменение момента импульса электрона при движении его в неоднородном магнитном поле, имеющем ось симметрии, из точки А до точки С, равно разности магнитных потоков через сечения S_1 и S_2 , умноженной на $e/2\pi$, (т.е. $\Delta L_e = \frac{e}{2\pi} \Delta \Phi$).



Электромагнитная индукция

3.5.118. Круговой проволочный виток площадью $S = 0,01 \text{ м}^2$ находится в однородном магнитном поле, индукция которого $B = 1 \text{ Тл}$. Плоскость витка перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. Определите среднюю ЭДС индукции, возникающую в витке при выключении поля в течение времени $t = 10 \text{ мс}$.

3.5.119. В однородном магнитном поле, индукция которого $B = 0,1 \text{ Тл}$, равномерно вращается катушка, состоящая из $N = 100$ витков проволоки. Частота вращения катушки $n = 5 \text{ с}^{-1}$; площадь поперечного сечения $S = 0,01 \text{ м}^2$. Ось вращения перпендикулярна к оси катушки и направлению магнитного поля. Определите максимальное значение ЭДС индукции во вращающейся катушке.

3.5.120. Горизонтальный стержень длиной 1 м вращается в магнитном поле с индукцией $B = 50 \text{ мкТл}$ вокруг вертикальной оси, проходящей через один из его концов. Ось вращения параллельна силовым линиям магнитного поля. При какой частоте вращения стержня разность потенциалов на концах этого стержня равна 1 мВ ?

3.5.121. На соленоид длиной $L = 20 \text{ см}$ и площадью поперечного сечения 3 см^2 надет проволочный виток. Обмотка соленоида имеет 320 витков, и по ней течет ток силой 3 А . Определите среднюю ЭДС, которая индуцируется в надетом на соленоид медном витке, когда ток в соленоиде выключается в течение времени 1 мс ?

3.5.122. Определите среднюю ЭДС, которая индуцируется в витке, если соленоид, рассмотренный в предыдущей задаче, имеет железный сердечник, с магнитной проницаемостью $\mu = 3 \cdot 10^2$?

3.5.123. На соленоид длиной 144 см и диаметром 5 см надет проволочный виток. Обмотка соленоида имеет 2000 витков, и по ней течет ток 2 А . Соленоид имеет железный сердечник с магнитной проницаемостью $\mu = 3 \cdot 10^2$. Определите среднюю ЭДС, которая индуцируется в надетом на соленоид витке, если ток в соленоиде выключается в течение времени 2 мс ?

3.5.124. В однородном магнитном поле, индукция которого $0,1 \text{ Тл}$, вращается катушка, состоящая из 200 витков. Ось вращения катушки перпендикулярна к ее оси и к направлению магнитного поля. Период

обращения катушки 0,2 с. Площадь поперечного сечения 4 см². Определите максимальную ЭДС индукции во вращающейся катушке.

3.5.125. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл в плоскости, перпендикулярной B , равномерно вращается стержень длиной 10 см с частотой 8 с^{-1} . Ось вращения перпендикулярна стержню и проходит через один из его концов. Определите возникающее на концах стержня напряжение.

3.5.126. Самолет, имеющий размах крыльев 30 м, летит горизонтально со скоростью 600 км/ч. Определите разность потенциалов на концах крыльев, если вертикальная составляющая магнитного поля Земли равна 40 А/м.

3.5.127. В однородном магнитном поле, индукция которого 0,8 Тл, равномерно вращается рамка с угловой скоростью 15 рад/с. Площадь рамки 150 см². Ось вращения находится в плоскости рамки и составляет 30° с направлением силовых линий магнитного поля. Определите максимальное значение ЭДС индукции во вращающейся рамке.

3.5.128. Круговой контур, радиус которого 2 см, помещен в однородное магнитное поле, индукция которого 0,2 Тл. Плоскость контура перпендикулярна направлению магнитного поля, сопротивление контура 1 Ом. Какой заряд пройдет через катушку при повороте ее на 90°?

3.5.129. В магнитное поле, индукция которого равна 0,1 Тл, помещена квадратная рамка из медной проволоки. Площадь поперечного сечения проволоки 1 мм². Нормаль к плоскости рамки направлена по силовым линиям поля. Какой заряд пройдет по контуру рамки при выключении поля, если длина проволоки 1 м?

3.5.130. Катушка из 200 витков с площадью поперечного сечения 200 см² вращается в магнитном поле с индукцией 0,5 Тл, так что ось ее вращения параллельна силовым линиям поля и перпендикулярна оси катушки. Частота вращения катушки 50 Гц. Определите амплитуду индуцированной ЭДС.

3.5.131. Круговой контур радиусом 4 см помещен в однородное магнитное поле, индукция которого 0,1 Тл. Плоскость контура перпендикулярна направлению магнитного поля. Сопротивление контура 1 Ом. Какой заряд пройдет через катушку при выключении поля?

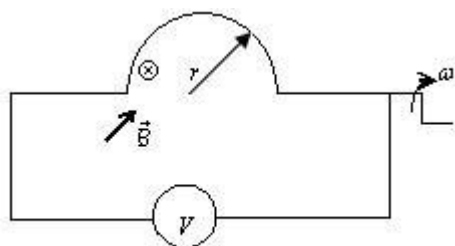
3.5.132. Соленоид диаметром 6 см поворачивается в магнитном поле индукции 1 Тл на 180° за 0,05 с. Определите ЭДС индукции, возникающую в соленоиде, если он имеет 100 витков.

3.5.133. Электромагнит создает между двумя квадратными полюсными наконечниками, площади которых по 100 см^2 , однородное поле индукции $0,8 \text{ Тл}$. С какой наименьшей скоростью надо перемещать проводник перпендикулярно полю, чтобы возбудить в нем ЭДС индукции $1,5 \text{ В}$?

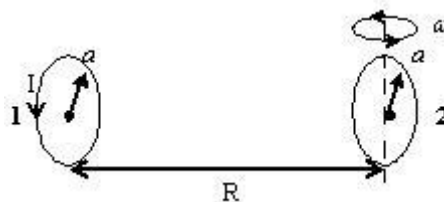
3.5.134. Рамка площадью 200 см^2 , расположенная перпендикулярно магнитному полю, имеет 100 витков, сопротивление ее 5 Ом , индукция магнитного поля $0,08 \text{ Тл}$. Какой заряд пройдет по контуру, если ее вынести из поля?

3.5.135. Виток радиусом 5 см расположен перпендикулярно магнитному полю напряженности $5 \cdot 10^5 \text{ А/м}$. Определите сопротивление витка, если при исчезновении поля через виток проходит заряд 1 мКл .

3.5.136. Жесткий провод, согнутый в полукруг радиуса r , вращается с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле B , перпендикулярном оси вращения. Определите напряжение и силу тока, наведенного в проводнике, если внутреннее сопротивление вольтметра R , а сопротивлением остальных частей цепи можно пренебречь. Магнитное поле тока не может заметно изменить величину магнитной индукции B .



3.5.137. По круговому витку (1) радиуса a течет постоянный ток I . Другой такой же виток помещен на оси первого витка на расстоянии $R \gg a$. Плоскости витков параллельны. Затем виток (2) приводится во вращение вокруг одного из диаметров с угловой скоростью ω . Какова наведенная в витке (2) ЭДС, если он разомкнут?



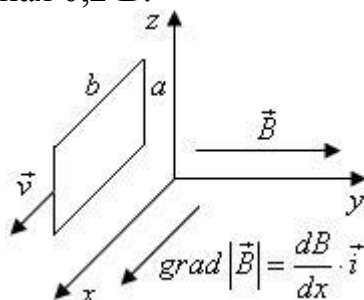
3.5.138. Соленоид содержит $N = 600$ витков. Площадь сечения немагнитного сердечника $S = 8 \text{ см}^2$. По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B = 5 \text{ мТл}$. Определите среднее значение ЭДС

самоиндукции, которая возникает на зажимах соленоида, если ток уменьшается до нуля за время $\Delta t = 0,6$ мс.

3.5.139. Из куска провода длиной 2 м и сопротивлением 2 Ом сделана квадратная рамка так, что площадь ее перпендикулярна к горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли, равной 15,9 А/м. Определите заряд, который пройдет по проводнику в процессе его движения.

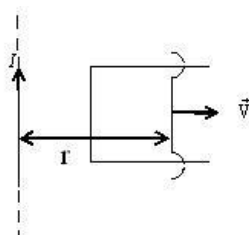
3.5.140. Соленоид длиной 2 м, состоящий из 1000 витков, площадью поперечного сечения 8 см^2 включается в цепь, где сила тока изменяется на 20 А за 0,1 секунду. Определите ЭДС самоиндукции, возбуждающуюся в соленоиде, если в него вставлен железный сердечник с магнитной проницаемостью равной 500.

3.5.141. С какой скоростью должна двигаться прямоугольная рамка со сторонами $a = 50$ см и $b = 2$ см в магнитном поле, перпендикулярном ее плоскости, в направлении градиента поля $|\text{grad } B| = 2$ Тл/м, чтобы в ней индуцировалась ЭДС равная 0,2 В.

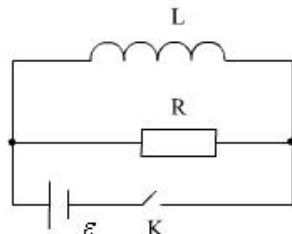


3.5.142. В электрической цепи с сопротивлением $R = 10$ Ом и индуктивностью $L = 0,05$ Гн течет ток, силой 60 А. Определите силу тока в цепи через $\Delta t = 0,6$ мс после отключения ЭДС источника тока.

3.5.143. Длинный прямой проводник с током I и П-образный проводник с подвижной перемычкой расположены в одной плоскости, как показано на рисунке. Перемычку, длина которой l и сопротивление R , перемещают вправо с постоянной скоростью V . Определите ток, индуцируемый в контуре, как функцию расстояния r между перемычкой и прямым проводником. Сопротивление П-образного проводника и ЭДС самоиндукции контура пренебрежимо малы.

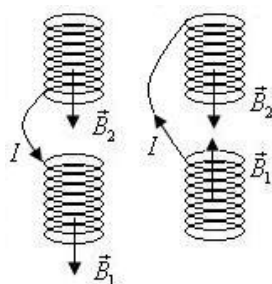


3.5.144. Цепь состоит из катушки индуктивностью $L = 1$ Гн, сопротивления и источника тока, который можно отключить, не разрывая цепь. Время, по истечении которого сила тока уменьшится до 0,001 от первоначального значения, равно 0,69 с. Определите сопротивление R .



3.5.145. По катушке индуктивностью $L = 5$ мГн течет ток силой $I = 3$ А. При выключении тока он изменяется до нуля за время $\Delta t = 8$ мс. Определите среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре.

3.5.146. Две катушки, индуктивности которых $L_1 = 3$ мГн, $L_2 = 5$ мГн, соединены последовательно (рис.). Индуктивность системы $L = 11$ мГн. Как изменится индуктивность системы, если в одной из катушек направление тока изменить на противоположное при неизменном взаимном расположении катушек?

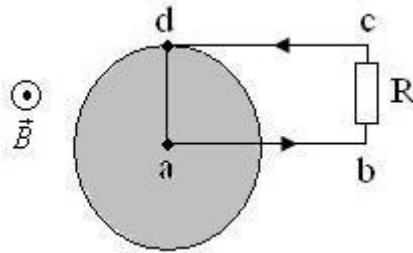


3.5.147. Цепь состоит из двух последовательно соединенных катушек индуктивности L_1 и L_2 . Взаимная индуктивность катушек L_{12} . Определите полную индуктивность цепи.

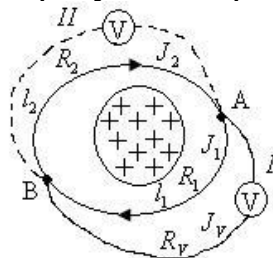
3.5.148. Объем длинного тонкостенного соленоида $V = 10$ дм³, индуктивность $L = 0,01$ Гн. На соленоид подали напряжение $U = 10$ В. Через какое время после подачи напряжения индукция магнитного поля в соленоиде достигнет значения $B = 0,1$ Тл?

3.5.149. В однородном магнитном поле индукции B вращается в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, медный диск радиуса r , совершая n оборотов в секунду. При помощи скользящих контактов диск подключен к цепи, сопротивлением R . Определите ЭДС индукции, возникающую при

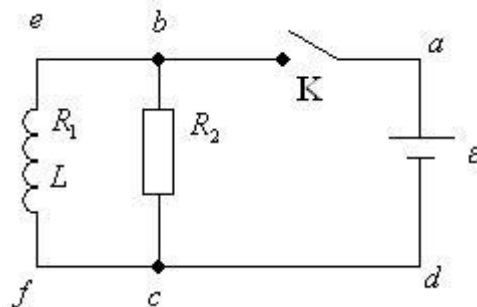
вращении диска, заряд, протекающий по цепи, и количество теплоты, выделяющееся за время, в течение которого диск совершит N оборотов.



3.5.150. Виток медной проволоки охватывает сердечник трансформатора. Магнитный поток внутри сердечника изменяется по гармоническому закону с амплитудным значением ЭДС 30 Вб/с. К точкам A, B , которые делят виток на два участка так, что $l_2 = 2l_1$, подключен вольтметр двумя способами, изображенными на рисунке. Определите его показания.



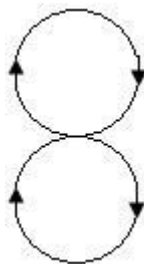
3.5.151. В цепи (см. рис.) $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 95 \text{ Ом}$, $L = 0,34 \text{ Гн}$, $\mathcal{E} = 38 \text{ В}$. Внутреннее сопротивление батареи пренебрежимо мало. Определите ток в резисторе R_2 в трех случаях: 1) до размыкания цепи; 2) в первый момент после размыкания; 3) через 0,01 с после размыкания.



3.5.152. Две катушки намотаны на один общий сердечник. Индуктивность одной из них 0,1 Гн, второй 0,4 Гн, сопротивление второй катушки 300 Ом. Определите ток, который потечет по второй катушке, если ток 0,6 А, текущий в первой, выключить в течение 0,001 с?

3.5.153. Кольцевой виток с током находится в переменном магнитном поле, индукция которого $B = B_0 \sin(\omega t)$ перпендикулярна плоскости витка. Виток превратили в восьмерку, составленную из двух равных колец, не выводя при этом провод витка из плоскости. Определите, во сколько раз

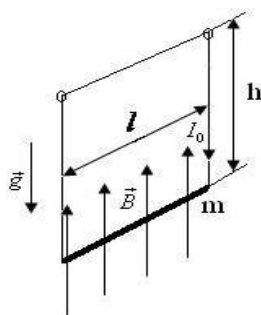
при этом изменится амплитуда тока в витке? Индуктивностью витка пренебречь.



3.5.154. Проволочное кольцо диаметром d , имеющее сопротивление R , помещено в переменное однородное магнитное поле, перпендикулярное его плоскости. Магнитная индукция нарастает линейно за время t_1 от нуля до значения B и затем линейно уменьшается до нуля за время t_2 . Определите количество теплоты выделяющееся в кольце?

3.5.155. Проволочная прямоугольная рамка со сторонами длиной l_1 и l_2 , массами m_1 и m_2 , может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси так, что одна из сторон длиной l_1 остается неподвижной. Рамка находится в вертикальном, однородном магнитном поле индукции $\vec{B}$. Определите силу тока в рамке, при которой она будет неподвижна в поле тяготения Земли и наклонена к горизонту под углом α .

3.5.156. Проволочная рамка, имеющая П-образную форму, подвешена на горизонтальной оси и находится в однородном вертикально направленном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ (см. рис.). Рамка состоит из стержня длиной l и массы m и двух невесомых жестких стержней длины h . Через рамку пропускают кратковременный импульс тока силой I_0 длительности τ . Определите максимальный угол отклонения рамки от первоначального положения. Смещение рамки за время τ очень мало.



3.5.157. Электрическая лампа с сопротивлением в нагретом состоянии $R=10\text{ Ом}$ подключается через дроссель к аккумулятору напряжением 12 В. Индуктивность дросселя $L=2\text{ Гн}$, сопротивление $r=1\text{ Ом}$. Определите время, через которое лампа загорится, если она начинает заметно светиться при напряжении $U=6\text{ В}$.

3.5.158. Катушка длиной $l = 20 \text{ см}$, диаметром $D = 2 \text{ см}$, содержащая $N = 200$ витков медной проволоки с поперечным сечением $S = 1 \text{ мм}^2$, включена в цепь с ЭДС. При помощи ключа источник ЭДС выключается, и катушка замыкается накоротко. Через какое время ток в цепи уменьшится в два раза?

3.5.159. Постройте график зависимости силы тока в контуре сопротивлением $R = 2 \text{ Ом}$ и индуктивностью $L = 0,2 \text{ Гн}$ от времени, прошедшего с момента включения в цепь ЭДС, для интервала $0 \leq t \leq 0,5 \text{ с}$, с шагом $0,1 \text{ с}$. По оси ординат откладывается отношение силы тока к установившемуся значению тока.

3.5.160. Квадратная рамка площадью $S = 25 \text{ см}^2$ из медной проволоки сечением $S = 1 \text{ мм}^2$ помещена в магнитное поле, индукция которого изменяется по закону $B(t) = B_0 \sin(\omega t)$, где $B_0 = 0,01 \text{ Тл}$, $\omega = 2\pi/T$, $T = 0,02 \text{ с}$. Плоскость рамки перпендикулярна к направлению силовых линий магнитного поля. Определить зависимость от времени и наибольшее значение: 1) магнитного потока, пронизывающего рамку; 2) ЭДС индукции; 3) тока текущего по рамке.

3.5.161. Две катушки имеют взаимную индуктивность $L_{12} = 5 \text{ мГн}$. В первой ток изменяется по закону $I(t) = I_0 \sin(\omega t)$, $I_0 = 10 \text{ А}$, $T = 0,02 \text{ с}$. Определить зависимость $\varepsilon_2(t)$ ЭДС индукции во второй катушке и ее наибольшее значение.

Магнитное поле в веществе. Энергия магнитного поля

3.5.162. Определите плотность магнитной энергии в катушке с железным сердечником ($\mu = 2000$), по которой течет ток $0,2 \text{ А}$. На каждый сантиметр длины катушки приходится 5 витков.

3.5.163. Соленоид длиной 50 см и площадью поперечного сечения 2 см^2 имеет индуктивность $2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$. При какой силе тока объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоиды равна 10^{-3} Дж/м^2 ?

3.5.164. Определите число ампер-витков в тонком соленоиде длиной 60 см , чтобы объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоиды была равна $1,75 \text{ Дж/м}^3$?

3.5.165. Во сколько раз нужно увеличить силу тока в соленоиде, чтобы плотность энергии магнитного поля в нем выросла в 16 раз? Во сколько раз нужно увеличить число витков на единицу длины соленоида, чтобы плотность энергии магнитного поля при том же значении силы тока учетверилась?

3.5.166. По соленоиду, с железным сердечником, течет ток $I=5$ А. Длина соленоида 1 м, число витков 500. Определите намагниченность и объемную плотность энергии магнитного поля соленоида. Зависимость $B = f(H)$ приведена на рисунке к задаче 3.5.175.

3.5.167. Катушка с железным сердечником имеет площадь поперечного сечения $S = 20$ см² и число витков $N = 500$. Индуктивность катушки с сердечником $L = 0,28$ Гн при токе через обмотку $I = 5$ А. Определите магнитную проницаемость железа.

3.5.168. Соленоид длиной 50 см и площадью поперечного сечения 2 см² имеет индуктивность 0,2 мкГн. При каком токе объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоида $w_0=1$ мДж/м³?

3.5.169. В соленоид длиной 50 см вставлен сердечник из железа. Число витков на единицу длины соленоида $n=400$ см⁻¹; площадь поперечного сечения соленоида 10 см². Определите магнитную проницаемость материала сердечника при токе через обмотку соленоида 5 А, если магнитный поток, пронизывающий поперечное сечение сердечника соленоида $\Phi = 1,6$ мВб. Какова индуктивность соленоида при этих условиях?

3.5.170. Для измерения магнитной проницаемости железа из него был изготовлен тороид длиной 50 см и площадью поперечного сечения 4 см². Одна из обмоток тороида имела $N_1 = 500$ витков и была присоединена к источнику тока, другая имела $N_2 = 1000$ витков и была присоединена к гальванометру. Определите магнитную проницаемость железа, если при переключении в первичной обмотке направления тока силой 1 А на противоположное через гальванометр прошел электрический заряд $q = 0,06$ Кл. Сопротивление вторичной обмотки 20 Ом.

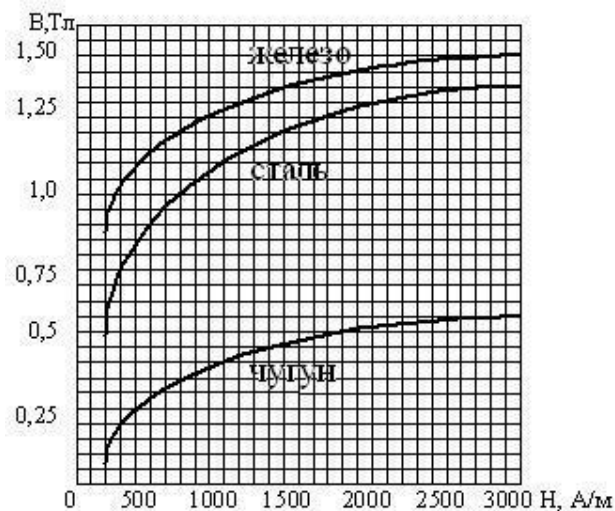
3.5.171. Определите магнитную индукцию B в замкнутом железном сердечнике тороида длиной 20,9 см, если число ампер-витков обмотки тороида 150. Какова магнитная проницаемость материала сердечника при этих условиях? Зависимость $B(H)$ приведена на рисунке.

3.5.172. Обмотка соленоида содержит $n = 10$ витков на каждый сантиметр длины. При какой силе тока объемная плотность энергии магнитного поля будет равна 1 Дж/м^3 ? Сердечник выполнен из немагнитного материала. Магнитное поле во всем объеме однородно.

3.5.173. Соленоид имеет длину $l = 1 \text{ м}$ и сечение $S = 20 \text{ см}^2$. При некоторой силе тока в нем создается магнитный поток $\Phi = 80 \text{ мкВб}$. Определите энергию W магнитного поля соленоида? Сердечник выполнен из немагнитного материала и магнитное поле во всем объеме однородно.

3.5.174. Обмотка тороида имеет $n = 8$ витков на каждый сантиметр длины (по средней линии тороида). Вычислите объемную плотность энергии магнитного поля при силе тока $I = 20 \text{ А}$. Сердечник выполнен из немагнитного материала. Магнитное поле во всем объеме однородно.

3.5.175. Обмотка соленоида с железным сердечником содержит $N = 500$ витков. Длина сердечника $l = 50 \text{ см}$. Как и во сколько раз изменится индуктивность L соленоида, если сила тока, протекающего по обмотке, возрастет от $I_1 = 0,1 \text{ А}$ до $I_2 = 1 \text{ А}$? Для решения задачи используйте график зависимости B от H , приведенный на рисунке.



Зависимость магнитной индукции B от напряженности H внешнего поля для железа, стали чугуна

3.5.176. Магнитный поток Φ соленоида сечением $S = 10 \text{ см}^2$ равен 10 мкВб . Определите объемную плотность энергии магнитного поля соленоида. Сердечник выполнен из немагнитного материала. Магнитное поле во всем объеме однородно.

3.5.177. Тороид диаметром $D = 40 \text{ см}$ (по средней линии) и площадью сечения $S = 10 \text{ см}^2$ содержит $N = 1200$ витков. Вычислите энергию магнитного поля

тороида при силе тока $I = 10$ А. Сердечник выполнен из немагнитного материала. Магнитное поле во всем объеме однородно.

3.5.178. Соленоид имеет полностью размагниченный стальной сердечник объемом $V = 200$ см³. Напряженность H магнитного поля соленоида при силе тока $I = 0,5$ А равна 700 А/м. Определите индуктивность L соленоида.

3.5.179. Соленоид содержит $N = 800$ витков. При силе тока $I = 1$ А магнитный поток через один виток 0,1 мВб. Определите энергию W магнитного поля соленоида. Сердечник выполнен из немагнитного материала. Магнитное поле во всем объеме однородно.

3.5.180. Определите плотность энергии магнитного поля в центре кольцевого проводника, имеющего радиус $R = 25$ см и содержащего $N = 100$ витков. Сила тока в проводнике $I = 2$ А.

3.5.181. При какой силе тока в прямолинейном бесконечно длинном проводнике плотность энергии магнитного поля на расстоянии $r = 1$ см от проводника равна 0,1 Дж/м³?

3.5.182. Соленоид содержит $N = 800$ витков. При силе тока $I = 6$ А в обмотке соленоида магнитный поток пронизывающий его витки $\Phi = 30$ мкВб. Определите индуктивность L соленоида.

3.5.183. Соленоид сечением $S = 6$ см² содержит $N = 1500$ витков. Индукция B магнитного поля внутри соленоида при силе тока $I = 4$ А равна 0,08 Тл. Определите индуктивность L соленоида.

3.5.184. Источник тока замкнули на катушку с сопротивлением $R = 20$ Ом и индуктивностью $L = 0,4$ Гн. Через какое время сила тока в цепи достигнет 95% от максимального значения?

3.5.185. По замкнутой цепи с сопротивлением $R = 23$ Ом течет ток. Через 10 мс после выключения ЭДС сила тока в ней уменьшилась в 10 раз. Определите индуктивность цепи.

3.5.186. Источник тока замкнули на катушку сопротивлением $R = 10$ Ом. По истечении времени $t = 0,23$ с сила тока в цепи I достигла величины равной 0,9 от предельного значения. Определите индуктивность катушки.

3.5.187. Две катушки намотаны на один общий сердечник. Индуктивность одной из них 0,1 Гн, второй 0,4 Гн. Сопротивление второй катушки 300

Ом. Какой ток потечет по второй катушке, если ток силой 0,6 А, текущий в первой катушке, выключается в течение 0,001 секунд?

3.5.188. По обмотке соленоида индуктивностью $L = 3$ мГн, внутри которой находится диамагнитный сердечник, течет ток $I = 0,4$ А. Длина соленоида $l = 45$ см, площадь поперечного сечения $S = 10$ см² и число витков $N = 1000$. Определить индукцию магнитного поля и намагниченность внутри соленоида.

3.5.189. Тороид с железным ненамагниченным сердечником, длина которого по средней линии $l_1 = 1$ м, имеет воздушный зазор $l_2 = 3$ мм. По обмотке тороида, содержащей $N = 1300$ витков, пропускают ток, в результате индукция в зазоре стала $B_2 = 1$ Тл. Определите силу тока.

3.5.190. После выключения тока в обмотке тороида из предыдущей задачи остаточная индукция в зазоре стала равной $B_r = 4,2$ мТл. Определите остаточную намагниченность сердечника, а так же напряженность поля H в железе.

3.5.191. По обмотке соленоида с числом витков 1000, длиной $l = 0,5$ м, диаметром 4 см, течет ток $I = 0,5$ А. Определите потокосцепление, энергию и объемную плотность энергии соленоида.

3.5.192. По обмотке тороида с ненамагниченным железным сердечником протекает ток $I = 0,6$ А. Витки провода диаметром $d = 0,4$ мм плотно прилегают друг к другу, площадь сечения тороида и диаметр средней линии равны соответственно $S = 4$ см², $D = 30$ см. Определить потокосцепление и объемную плотность энергии тороида.

3.5.193. На тороид, средний диаметр которого $d = 30$ см, площадь поперечного сечения $S = 1,6$ см², число витков $N = 800$, надета одновитковая катушка с баллистическим гальванометром. Внутри обмотки помещено ненамагниченное железное кольцо, и когда по обмотке пропустили ток $I = 1,8$ А, через гальванометр прошел заряд $q = 0,24$ мКл. Сопротивление цепи гальванометра $R = 0,8$ Ом. Определите напряженность H и индукцию B магнитного поля внутри тороида, намагниченность и магнитную проницаемость железа.

3.5.194. Используя условия предыдущей задачи, определите остаточную намагниченность J_r железного сердечника тороида, остаточную индукцию и напряженность поля внутри него после исчезновения тока в обмотке.

Заряд, прошедший через баллистический гальванометр после выключения тока в обмотке, составил $q' = 80 \text{ мкКл}$.

3.5.195. Через катушку индуктивности $L = 20 \text{ мГн}$ течет ток, изменяющийся со временем по закону $I = I_0 \sin(\omega t)$, где $I_0 = 5 \text{ А}$, $T = 0,02 \text{ с}$. Определите зависимость ЭДС самоиндукции от времени и зависимость энергии магнитного поля катушки от времени.

3.5.196. Катушка диаметром $D = 2 \text{ см}$, содержащая один слой плотно прилегающих друг к другу $N = 500$ витков алюминиевого провода сечением $S_0 = 1 \text{ мм}^2$, находится в магнитном поле. Ось катушки параллельна линиям магнитной индукции, величина которой изменяется со скоростью $\frac{\Delta |\vec{B}|}{\Delta t} = 1 \frac{\text{мТл}}{\text{с}}$. Определите тепловую мощность P , выделяемую в катушке, если ее концы замкнуты накоротко. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Основы теории Максвелла. Электромагнитные колебания и волны

3.5.197. Напряженность электрического поля в зазоре между обкладками конденсатора площадью 1 см^2 , заполненного диэлектриком с $\varepsilon = 1000$, изменяется равномерно со скоростью $0,17 \text{ МВ/мс}$. Определите силу тока смещения электрического поля.

3.5.198. Ток, проходящий по обмотке длинного прямого соленоида радиусом R , изменяют так, что величина индукции магнитного поля внутри соленоида зависит от времени по закону $|\vec{B}| = A \cdot t^2$, где A – некоторая постоянная. Определите плотность тока смещения как функцию расстояния r по оси соленоида. Построить график зависимости $j_{\text{см}}(r)$.

3.5.199. Длинный цилиндрический конденсатор заряжается от источника ЭДС. Пренебрегая краевыми эффектами докажите, что величина тока смещения в диэлектрике, заполняющем пространство между пластинами конденсатора, равна величине тока в цепи источника ЭДС.

3.5.200. Поверхность шара покрыта равномерным слоем радиоактивного вещества, которое испускает α – частицы высокой энергии. Предположим, что α – частицы вылетают только наружу от поверхности шара, причем только в радиальном направлении. С поверхности шара тем самым стекают

заряды, т.е. течет некоторый ток. Определите величину и направление вектора индукции магнитного поля тока частиц.

3.5.201. Используя систему уравнений Максвелла докажите, что переменное во времени магнитное поле не может существовать в отсутствие электрического поля.

3.5.202. Докажите, что уравнения Максвелла $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ и $\text{div } \vec{B} = 0$ совместны, т.е. уравнения взаимно непротиворечивы.

3.5.203. В некоторой области инерциальной системы отсчета существует вращающееся с угловой скоростью $\vec{\omega}$ магнитное поле, модуль вектора индукции которого $B = \text{const}$. Определите $\text{rot } \vec{E}$ в этой области как функцию векторов $\vec{\omega}$ и $\vec{B}$.

3.5.204. В однородной изотропной среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=2$ и магнитной проницаемостью $\mu=1$ распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля $E_0 = 50$ В/м. Определите амплитуду магнитного поля H_0 и фазовую скорость v волны.

3.5.205. Внутри плоского конденсатора параллельно его обкладкам движется со скоростью v металлическая пластина, толщина которой равна половине расстояния h между обкладками конденсатора. На них поддерживается напряжение U . Определите индукцию магнитного поля внутри пластины.

3.5.206. Магнитное поле при разрядке конденсатора создается не только током в проводнике, но и изменяющимся электрическим полем в пространстве между обкладками конденсатора, причем изменяющееся электрическое поле создает такое магнитное поле, как если бы между обкладками существовал ток, равный току в проводнике. Докажите это.

3.5.207. Сила тока в открытом колебательном контуре в виде стержня изменяется по закону $i = 400 \cos(2 \cdot 10^8 \pi t)$ мА. Определите длину l этого стержня, если на нем укладывается четыре длины волны.

3.5.208. Изменение разности потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре происходит в соответствии с уравнением $U = 50 \cos 10^4 \pi t$. Емкость конденсатора $C = 0,1$ мкФ. Определите период колебаний T , индуктивность L контура, закон изменения тока со временем, длину волны λ .

3.5.209. Максимальная сила тока в колебательном контуре $I_0=0,1$ А, максимальное напряжение на обкладках конденсатора $U_0=200$ В. Определите циклическую частоту колебаний, если энергия контура $W=0,2$ мДж.

3.5.210. Напряжение на обкладках конденсатора в колебательном контуре изменяется по закону $U = 10 \cos 10^4 t$. Емкость конденсатора $C=10$ мкФ. Определите индуктивность контура и закон изменения силы тока в нем.

3.5.211. Сила тока в колебательном контуре изменяется по закону $I = 0,1 \sin 10^3 t$ (А). Индуктивность контура $L=0,1$ Гн. Определите емкость конденсатора C и закон изменения напряжения в нем.

3.5.212. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C=5$ мкФ и катушки индуктивности $L=0,2$ Гн. Определите максимальную силу тока I_0 , если максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора $U_0=90$ В. Сопротивлением контура пренебречь.

3.5.213. Добротность колебательного контура $Q=5$. Определите, на сколько процентов отличается частота ω свободных колебаний контура от его собственной частоты ω_0 .

3.5.214. Определите энергию, которую переносит за время $t=1$ мин. плоская синусоидальная волна, распространяющаяся в вакууме, через площадку $S=10$ см², расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. Амплитуда напряженности электрического поля волны $E_0=1$ мВ/м. Период волны $T \ll t$.

3.5.215. Как связана напряженность электрического поля волны $\vec{E}$ и магнитная индукция $\vec{B}$ в среде с диэлектрической проницаемостью ε и магнитной проницаемостью μ .

3.5.216. В некоторой среде распространяется электромагнитная волна частоты ω . При частоте ω диэлектрическая проницаемость среды $\varepsilon=2$, магнитная проницаемость практически равна единице. Определите выражение вектора Умова-Пойтинга $\vec{S}$ в той точке, в которой вектор напряженности электрического поля изменяется со временем по закону $\vec{E} = 10 \cos(\omega t + \alpha) \cdot \vec{k}$ (В/м), где $\vec{k}$ – орт оси Oz, α – начальная фаза. Амплитуда вектора $\vec{H}$ имеет вид $H_m \cdot \vec{i}$, где $\vec{i}$ – орт оси Ox.

3.5.217. По прямому проводу круглого сечения радиуса a течет постоянный ток I . Определите поток энергии электромагнитного поля через боковую поверхность участка провода длины l . Сравните полученный результат с законом Джоуля-Ленца.

3.5.218. Протоны, имеющие одинаковую скорость $\vec{v}$, образуют пучок круглого сечения с током I . Найти направление и модуль вектора Умова-Пойтинга $\vec{S}$ вне пучка на расстоянии r от его оси.

3.5.219. Разность потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре изменяется с течением времени по закону $U(t) = 20 \cos(10^2 \pi t)$ В, емкость конденсатора $C = 0,5 \text{ мкФ}$. Определить: 1) период колебаний; 2) индуктивность контура; 3) длину электромагнитной волны, излучаемую контуром.

3.5.220. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $37,5 \text{ пФ}$ и катушки индуктивностью $0,68 \text{ Гн}$. Максимальное значение заряда на обкладках конденсатора равно $2,5 \text{ мкКл}$. Напишите уравнения изменения напряжения и заряда на обкладках конденсатора и силы тока в цепи, а также определите мгновенные значения указанных величин в момент времени $T/2$, где T – период собственных колебаний в контуре.

3.5.221. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ и катушки индуктивностью $L = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$, число витков которой $N = 300$. Максимальное напряжение на конденсаторе $U_0 = 120 \text{ В}$. В момент времени $t = 0$ энергия электрического поля конденсатора равна энергии магнитного поля тока в катушке. Определите максимальный магнитный поток, пронизывающий катушку и начальную фазу колебаний напряжения.

3.5.222. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна, амплитуда напряженности электрического поля которой 100 В/м . Определите энергию, переносимую через площадку 50 см^2 , расположенную перпендикулярно направлению распространения волны за $t = 1 \text{ мин}$. Период волны $T \ll t$.

3.5.223. При разрядке плоского конденсатора площадь обкладок которого 10 см^2 , заполненного диэлектриком проницаемостью $\varepsilon = 10^3$, в подводящих проводах течет ток 1 мкА . Определите скорость изменения напряженности электрического поля в конденсаторе.

3.5.224. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 0,06 \text{ мГн}$, активного сопротивления $R = 2 \text{ Ом}$ и конденсатора емкостью $C = 0,04 \text{ мкФ}$. Определите среднюю мощность, которую должен потреблять контур, чтобы в нем поддерживались незатухающие колебания с амплитудным значением напряжения на конденсаторе $U_0 = 1,5 \text{ В}$.

3.5.225. Колебательный контур радиоприемника состоит из катушки с индуктивностью $L = 1,00 \text{ мГн}$ и переменного конденсатора, емкость которого может изменяться в пределах от $9,7 \text{ нФ}$ до 92 нФ . Определите, в каком диапазоне длин волн может принимать радиостанции этот приемник?

3.5.226. Параметры колебательного контура имеют значения: $C = 4 \text{ мкФ}$, $L = 0,1 \text{ мГн}$, $R = 1 \text{ Ом}$.

а) Определите добротность колебательного контура.

б) Определите относительную погрешность при вычислении добротности по приближенной формуле $Q = R^{-1} \sqrt{L/C}$.

3.5.227. Добротность колебательного контура $Q = 10$. Определите, на сколько процентов отличается частота свободных колебаний контура ω от собственной частоты контура ω_0 .

(Найти величину $\delta\omega = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$)

3.5.228. Собственная частота колебаний контура $\nu_0 = 8,0 \text{ кГц}$, добротность $Q = 72$. В контуре возбуждают затухающие колебания.

а) Найдите закон убывания запасенной в контуре энергии с течением времени - dW/dt .

б) Определите, какая часть первоначально запасенной энергии W_0 сохранится в контуре по истечении времени $\tau = 1,00 \text{ мс}$?

3.6. Вопросы

Магнитное поле в вакууме.

1. Электромагнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов. Запишите выражение для полной электромагнитной силы, действующей со стороны одного элементарного заряда на другой.
2. Что называется вектором индукции магнитного поля? Как определить ее направление для прямого тока и тока произвольной конфигурации?
3. Закон Био-Савара-Лапласа. Запишите его выражение в дифференциальной и интегральной формах.
4. Проведите расчет магнитного поля для: а) прямолинейного тока; б) кругового контура с током.
5. Что называется циркуляцией магнитной индукции? Покажите, что магнитное поле имеет вихревой характер.
6. Примените теорему о циркуляции вектора магнитной индукции к расчету полей, созданных соленоидом и тороидом.

7. Как действует магнитное поле на проводник с током? Что такое сила Ампера и как определить ее направление?
8. Примените закон Ампера к расчету: а) силы, с которой однородное магнитное поле действует на прямолинейный проводник с током; б) силы взаимодействия между двумя бесконечно длинными параллельными проводниками с током; в) вращательного момента, действующего со стороны магнитного поля на плоский контур с током.
9. Дайте определение магнитного потока. В каких единицах он измеряется?
10. Получите формулу для работы сил магнитного поля.
11. Сила Лоренца. Как движутся заряженные частицы в магнитном поле?
12. Эффект Холла и его использование для измерения индукции магнитного поля.
13. Опыты по определению удельного заряда электрона.

Магнитное поле в веществе.

1. Что происходит с различными веществами при внесении их в магнитное поле? Вектор намагничивания, его физический смысл.
2. Что такое магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества? Что они характеризуют?
3. Дайте определение и получите формулу для напряженности магнитного поля. Зачем она вводится? В каких единицах измеряется?
4. Расчет магнитного поля в веществе.
5. Опыты по определению магнитных моментов атомов. Опыты Энштейна и де-Гааза. Из чего складывается магнитный момент атомов?
6. По каким параметрам разделяются вещества на диа-, пара- и ферромагнетики? Рассмотрите механизм намагничивания диамагнетика. Что такое атомный диамагнетизм?
7. Какие вещества называются парамагнетиками? Закон Кюри. Объясните механизм намагничивания парамагнетиков.
8. Какие вещества называются ферромагнетиками? Чем они отличаются от других магнетиков? Что такое домен? Объясните кривую намагничивания ферромагнетика и петлю гистерезиса.
9. Объясните природу ферромагнетизма.

Электромагнитная индукция.

1. Поясните на примерах, в чем заключается явление электромагнитной индукции. Сформулируйте закон Фарадея-Ленца.
2. Расчет ЭДС индукции в движущихся и неподвижных контурах.
3. Взаимная индукция, ее практическое использование.

4. Явление самоиндукции, когда оно возникает? Расчет токов самоиндукции при замыкании и размыкании цепи.
5. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии.
6. Что называется колебательным контуром? Объясните процессы, протекающие в нем, и получите уравнение незатухающих колебаний.
7. Получите уравнение для вынужденных электромагнитных колебаний. Приведите примеры использования этих колебаний в технике.
8. Первое уравнение Максвелла, его физическое содержание.
9. Ток смещения. Второе уравнение Максвелла, его физическое содержание.
10. Система уравнений Максвелла в интегральной форме. Анализ.
11. Электромагнитное поле, распространение его в пространстве.
12. Электромагнитная волна, ее свойства, скорость распространения в вакууме.
13. Энергия. Вектор Умова-Пойнтинга и его направление. Плотность потока энергии.

Рекомендуемая литература

1. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский **Курс физики**: Учебное пособие для студентов вузов. – 5 - е издание, стереотипное – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 270 с.
2. И. В. Савельев **Курс общей физики**: Учебное пособие: Для студентов вузов. В 5 кн. Кн. 2 **Электричество и магнетизм** – 4 - е издание переработанное. – М.: Наука. Физматлит. 1998. – 336 с.
3. И. В. Савельев **Сборник вопросов и задач по общей физике**: Учебное пособие, 3-е издание, стереотипное – СПб.: Издательство «Лань», 2005.
4. И. Е. Иродов **Задачи по общей физике**: Учебное пособие – СПб.: Издательство «Лань», 2001.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Новиков Виталий Федорович
Невзорова Эльвира Германовна
Нерадовский Денис Федорович

**СБОРНИК ЗАДАНИЙ ПО ФИЗИКЕ
ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.
МАГНЕТИЗМ**

В авторской редакции

Дизайн обложки *А. В. Клеменко*

Подписано в печать 20.11.2013. Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 8,75.
Тираж 110 экз. Заказ № 1977.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Тюменский государственный нефтегазовый университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.