

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Вологодский государственный технический университет

Кафедра физики

ЭЛЕКТРОСТАТИКА, ПОСТОЯННЫЙ ТОК,
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Учебное пособие для самостоятельной работы студентов
и индивидуальные домашние задания по физике

ЧАСТЬ 2

Вологда
2012

Электростатика, постоянный ток, электромагнетизм. Учебное пособие для самостоятельной работы студентов и индивидуальные домашние задания по физике. Часть 2. - Вологда: ВоГТУ, 2012. - 80 с.

Методическое пособие написано в соответствии с программой курса физики. Во второй части пособия «Электростатика, постоянный ток, электромагнетизм» содержится 450 задач по всем темам этих разделов. Пособие рекомендуется для студентов-бакалавров направлений подготовки 270800 (строительство), 140100 (теплоэнергетика и теплотехника), а также других инженерных специальностей и направлений подготовки с трёхсеместровым курсом физики, обучающихся в ВоГТУ. Пособие предназначено для самостоятельной работы студентов. Оно содержит задачи для индивидуальных домашних заданий, примеры решения задач по каждой теме и краткий теоретический материал (основные законы и формулы), который может быть полезен не только при решении задач, но и при подготовке к зачётам и экзаменам.

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГТУ

Составитель: Л.А.Кузина, канд.физ.-мат.наук, доцент

Рецензент: В.А.Горбунов, доктор физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой ИТ

Требования к оформлению и общие методические указания по выполнению индивидуальных домашних заданий.

1. Студентам, изучающим курс физики в течение трёх семестров, необходимо решить в течение семестра 15 задач по второй части пособия.
2. Номер варианта совпадает с порядковым номером фамилии студента в журнале.
3. Номера задач в зависимости от номера варианта определяются по формуле: $N_{\text{задачи}} = 30n + N_{\text{варианта}}$, где $n = 0, 1, \dots, 14$.
4. Задания должны выполняться последовательно по пройденным темам. Сроки представления решенных задач объявляются преподавателем.
5. Задачи оформляются в письменном виде на отдельных листах. Решение каждой задачи необходимо начинать с новой страницы.
6. Требуется указать номер варианта и номер задачи по нумерации пособия.
7. Условие задачи переписывается полностью, без сокращений.
8. Решение записывается в стандартном виде:

Дано:	Решение:
Найти:	Ответ:

9. Все физические величины необходимо выразить в системе единиц СИ.
10. Сделать рисунок, схему, если это необходимо.
11. Сформулировать основные законы, записать формулы, на которых базируется решение. Обосновать возможность их применения в условиях данной задачи. Составить полную систему уравнений для решения задачи.
12. Получить окончательное выражение искомой величины в общем виде. Проверить размерность.
13. Подставить числовые данные и рассчитать искомую величину.
14. Проанализировать полученный результат.
15. Записать ответ.
16. Каждую задачу требуется защитить устно на собеседовании, продемонстрировав владение материалом; то есть полностью объяснить решение задачи (обосновать решение, сформулировав использованные физические законы и определения).

Раздел I. Электростатика и постоянный ток

1. Закон Кулона. Напряженность поля. Теорема Гаусса

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^3} \vec{r} - \text{закон Кулона}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} - \text{определение напряженности поля}$$

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i, \quad \vec{E} = \int d\vec{E} - \text{принцип суперпозиции}$$

$$\epsilon = \frac{E_{\text{вакуум}}}{E_{\text{диэлектрик}}} - \text{диэлектрическая проницаемость диэлектрика}$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^2} - \text{напряженность поля точечного заряда}$$

$$\rho = \frac{dq}{dV}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS}, \quad \tau = \frac{dq}{dl} - \text{объемная, поверхностная, линейная плотности заряда}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} - \text{напряженность поля плоскости}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon} - \text{напряженность поля конденсатора}$$

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r} - \text{напряженность поля нити (цилиндра при } r > R, R - \text{ радиус цилиндра)}$$

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E} - \text{вектор электрического смещения}$$

$$d\Phi_E = \vec{E}d\vec{S}, \quad \Phi_E = \int E dS \cos\alpha - \text{поток вектора напряженности}$$

$$d\Phi_D = \vec{D}d\vec{S}, \quad \Phi_D = \int D dS \cos\alpha - \text{поток вектора электрического смещения}$$

$$\oint_S E \cos\alpha dS = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_i q_i^{\text{свободн.}} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i (q_i^{\text{свободн.}} + q_i^{\text{связ.}}), \quad \oint_S D \cos\alpha dS = \sum_i q_i^{\text{свободн.}} -$$

теорема Гаусса

Примеры решения задач

Задача 1

Дано:
 $\tau = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл/м
 $l = 0.6$ м
 $b = 0.4$ м

Найти:
 $E = ?$

Определить напряжённость поля, создаваемого зарядом, равномерно распределённым по тонкому прямому стержню с линейной плотностью 200 нКл/м, в точке, лежащей на перпендикуляре, восстановленном в середине стержня, на расстоянии 40 см от его середины. Длина стержня 60 см.

Решение

Разобьем стержень на бесконечно малые элементы $dl = dy$; y – координата данного элемента (рис.1). Заряд элемента $dq = \tau dy$ можно считать точечным. Напряженность поля, созданного зарядом dq в точке А на расстоянии r от заряда, равна:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{\tau \cdot dy}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1)$$

где

$$r = \frac{b}{\cos \alpha}; \quad (2)$$

α – угол между перпендикуляром к стержню и радиус-вектором r элемента стержня, проведенным из точки А. Направление вектора напряженности см. на рис.1. Так как $y = b \operatorname{tg} \alpha$, то $\frac{dy}{d\alpha} = b \frac{1}{\cos^2 \alpha}$, то

$$dy = b \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

Найдем проекции dE на координатные оси:

$$dE_x = dE \cos \alpha; \quad dE_y = dE \sin \alpha, \quad (4)$$

Наконец, проекции полной напряженности на оси рассчитываются интегрированием:

$$\begin{cases} E_x = \int dE_x \\ E_y = \int dE_y \end{cases} \quad (5)$$

причем интегрирование производится по всей длине стержня. Здесь использован принцип суперпозиции в проекциях на оси. Полная напряженность вычисляется по теореме Пифагора:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}. \quad (6)$$

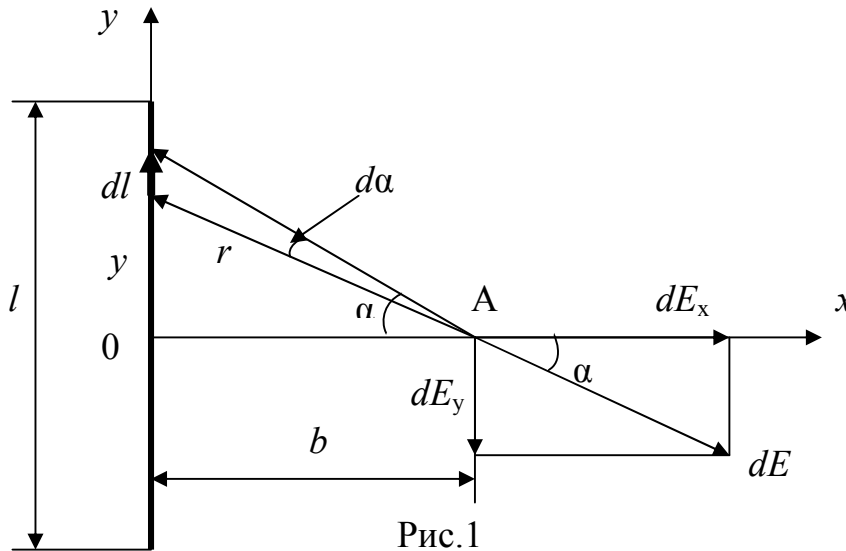


Рис.1

С учётом (1) – (4) получим из (5):

$$E_x = \int dE_x = \int \frac{\tau dy}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \alpha = \int \frac{\tau b d\alpha}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{b}{\cos \alpha}\right)^2 \cos^2 \alpha} \cos \alpha = \int \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 b} \cos \alpha d\alpha, \quad (7)$$

$$E_y = \int dE_y = \int \frac{\tau dy}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin \alpha = \int \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 b} \sin \alpha d\alpha.$$

Постоянную величину $\frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 b}$ выносим за знак интеграла и проставим

пределы интегрирования: угол α изменяется от $(-\alpha_0)$ до α_0 , где $\alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{l}{2b}$. Далее, первообразная функция от $\cos \alpha$ – это $\sin \alpha$, а от $\sin \alpha$ – $(-\cos \alpha)$. Тогда

$$E_x = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 b} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \cos \alpha d\alpha = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 b} (\sin \alpha) \Big|_{-\alpha_0}^{\alpha_0} = \frac{\tau \sin \alpha_0}{2\pi\epsilon_0 b},$$

$$E_y = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 b} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \sin \alpha d\alpha = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 b} (\cos \alpha_0 - (\cos(-\alpha_0))) = 0.$$

Окончательно получаем для напряженности:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 b} \sin \left(\arctg \left(\frac{l}{2b} \right) \right) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 b} \frac{l/2}{\sqrt{b^2 + (l/2)^2}} = \frac{\tau \cdot l}{4\pi\epsilon_0 b \sqrt{b^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}},$$

$$E = k \frac{\tau \cdot l}{b \sqrt{b^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} = 9 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 0.6}{0.4 \sqrt{0.4^2 + 0.3^2}} = 5.4 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

Ответ: $E=5.4 \cdot 10^3 \text{ В/м}$.

Задача 2

На двух коаксиальных бесконечных цилиндрах радиусами 5 см и 10 см равномерно распределены заряды с линейными плотностями заряда $\tau_1=100 \text{ нКл/м}$ и $\tau_2=-50 \text{ нКл/м}$ соответственно. Пространство между цилиндрами заполнено парафином с диэлектрической проницаемостью 2. Найти напряженность электрического поля в точках, удаленных от оси цилиндров на расстояния 3 см, 9 см, 15 см.

Дано:

$\tau_1=100 \text{ нКл/м}$

$\tau_2=-50 \text{ нКл/м}$

$R_1=0.05 \text{ м}$

$R_2=0.1 \text{ м}$

$r_1=0.03 \text{ м}$

$r_2=0.09 \text{ м}$

$r_3=0.15 \text{ м}$

$\epsilon=2$

Найти:

$E_1=?$

$E_2=?$

$E_3=?$

Решение

Симметрия задачи позволяет воспользоваться теоремой Гаусса: поток вектора напряженности электростатического поля через любую замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов, охваченных этой поверхностью, деленной на $(\epsilon\epsilon_0)$:

$$\oint_S E \cos \alpha dS = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_i q_i^{\text{свободн.}}. \quad (1)$$

Здесь α – угол между вектором $\vec{E}$ и нормалью к поверхности в данной точке. Возьмем Гауссову поверхность в виде цилиндра, коаксиального данным, высота которого равна h , а радиус r . Вектор $\vec{E}$ напряженности электростатического поля может быть направлен только перпендикулярно боковой поверхности

цилиндра, параллельно основаниям, (см. рис.2), тогда в левой части (1) надо учитывать только вклад через боковую поверхность цилиндра (для оснований $\alpha=90^\circ$, $\cos \alpha=0$), причем для боковой поверхности $\alpha=0$, $\cos \alpha=1$. Кроме того, в силу симметрии значение напряженности в любой точке боковой поверхности Гауссова цилиндра одинаково, и значение E можно вынести за знак интеграла. Тогда

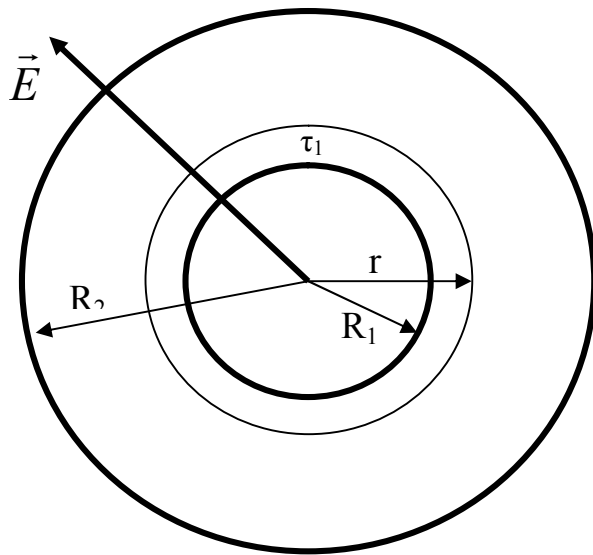


Рис.2

$$\oint_S E \cos \alpha dS = E \cdot \int_{\text{по боковой поверхности}} dS = E h 2\pi \cdot r, (2)$$

где $S = 2\pi r h$ – площадь боковой поверхности Гауссова цилиндра.

Теперь вычислим правую часть (1).

При этом нужно рассмотреть 3 случая:

1) $r_1 < R_1$. В этом случае внутри Гауссовой поверхности не попадают заряды ($q=0$), и тогда из (1) и (2) следует, что $E_1=0$.

2) $R_1 < r_2 < R_2$. Внутри Гауссовой поверхности попадают заряды,

находящиеся только на внутреннем цилиндре радиуса R_1 (см. рис.), поэтому суммарный заряд (по определению линейной плотности заряда):

$$q = \tau_1 h. (3)$$

Из (1) – (3) получим: $E_2 \cdot 2\pi r_2 h = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \tau_1 h$, откуда

$$E_2 = \frac{\tau_1}{2\pi \epsilon \epsilon_0 r_2} = \frac{2k\tau_1}{\epsilon r_2} = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0.09} = 10^4 \text{ В/м}. \text{ Здесь сделана замена } k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0}.$$

3) $R_2 < r_3$. Теперь Гауссова поверхность охватывает оба цилиндра, несущие свободные заряды с линейными плотностями τ_1 и τ_2 , но при этом она проходит вне диэлектрика, так что надо положить $\epsilon=1$, а $q=(\tau_1+\tau_2)h$, тогда

$$E_3 2\pi r_3 h = \frac{1}{\epsilon_0} (\tau_1 + \tau_2) h,$$

$$E_3 = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2\pi \epsilon_0 r_3} = \frac{2k(\tau_1 + \tau_2)}{r_3} = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 (100 - 50) \cdot 10^{-9}}{0.15} = 6 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

Ответ: $E_1=0$; $E_2=10^4$ В/м; $E_3=6 \cdot 10^3$ В/м.

1. Два положительных точечных заряда Q и $9Q$ закреплены на расстоянии 100 см друг от друга. Определить, в какой точке на прямой, проходящей через заряды, следует поместить третий заряд так, чтобы он находился в равновесии. Указать, какой знак должен иметь этот заряд для того, чтобы равновесие было устойчивым, если перемещения заряда возможны только вдоль прямой, проходящей через закреплённые заряды.
2. Два алюминиевых шарика массой по 10 г каждый подвешены на нитях, верхние концы которых соединены вместе. Длина каждой нити 10 см. Какие одинаковые заряды нужно сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол 60° ? Шарика погружены в глицерин с диэлектрической проницаемостью 43. Плотность алюминия 2700 кг/м^3 , глицерина – 1260 кг/м^3 .
3. В вершинах квадрата со стороной 10 см находятся одинаковые заряды по 0.3 нКл каждый. Определить модуль и направление силы, действующей на один из зарядов со стороны трех других.

4. Тонкое кольцо радиусом 30 см несёт равномерно распределённый заряд 2 мкКл. Определить силу, действующую на точечный заряд 40 нКл, расположенный на оси кольца на расстоянии 40 см от плоскости кольца.
5. Два шарика, массой по 0.1 г каждый, подвешены в одной точке на нитях длиной 20 см каждая. Получив одинаковый заряд, шарики разошлись так, что нити образовали между собой угол 60° . Найти заряд каждого шарика.
6. Два одинаковых заряженных шарика подвешены в одной точке на нитях одинаковой длины. При этом нити разошлись на некоторый угол. Шарики погружаются в масло с плотностью $8 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$. Определить диэлектрическую проницаемость масла, если угол расхождения нитей при погружении шариков в масло остаётся неизменным. Плотность материала шариков $1.6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
7. Расстояние между двумя точечными зарядами 0.1 мкКл и -0.1 мкКл равно 10 см. Определить силу, действующую на точечный заряд 0.1 мкКл, удалённый на 6 см от первого и на 8 см от второго заряда.
8. Тонкий длинный стержень заряжен равномерно с линейной плотностью 10 мкКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии 20 см от его конца находится точечный заряд 10 нКл. Определить силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда.
9. На продолжении оси тонкого прямого стержня, равномерно заряженного с линейной плотностью заряда 15 нКл/см, на расстоянии 40 см от конца стержня находится точечный заряд 10 мкКл. Второй конец стержня уходит в бесконечность. Определить силу взаимодействия стержня и заряда.
10. Тонкое полукольцо радиусом 10 см несёт равномерно распределённый заряд с линейной плотностью 1 мкКл/м. В центре кривизны полукольца находится заряд 20 нКл. Определить силу взаимодействия точечного заряда и заряженного полукольца.
11. Треть тонкого кольца радиусом 10 см равномерно заряжена с линейной плотностью 0.1 мкКл/м. Определить силу, действующую на точечный заряд величиной 0.01 мкКл, помещенный в центре кривизны кольца.
12. Тонкое кольцо радиуса 8 см несёт заряд, равномерно распределённый с линейной плотностью 10 нКл/м. Какова напряжённость электрического поля в точке, равноудалённой от всех точек кольца на расстояние 10 см?
13. Плоская квадратная пластина со стороной 10 см находится на некотором расстоянии от бесконечной равномерно заряженной плоскости с плотностью 1 мкКл/м^2 . Плоскость пластины составляет угол 30° с линиями поля. Найти поток электрического смещения через эту пластину.
14. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими одинаковый равномерно распределённый по площади заряд с поверхностной плотностью 1 нКл/м^2 . Определить напряжённость поля: а) между пластинами; б) вне пластин. Построить график изменения напряжённости вдоль линии, перпендикулярной пластинам.
15. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределённый по площади заряд с поверхностными плотностями 1 нКл/м^2 и 3 нКл/м^2 . Определить

- напряжённость поля: а) между пластинами; б) вне пластин. Построить график изменения напряжённости вдоль линии, перпендикулярной пластинам.
16. Два положительных точечных заряда Q и $4Q$ закреплены на расстоянии 60 см друг от друга. Определить, в какой точке на прямой, проходящей через заряды, следует поместить третий заряд так, чтобы он находился в равновесии. Указать, какой знак должен иметь этот заряд для того, чтобы равновесие было устойчивым, если перемещения заряда возможны только вдоль прямой, проходящей через закреплённые заряды.
 17. Тонкое кольцо радиусом 10 см несёт равномерно распределённый заряд 0.1 мкКл. На перпендикуляре к плоскости кольца, восстановленном из его середины, находится точечный заряд 10 нКл. Какова сила, действующая на точечный заряд со стороны заряженного кольца, если он удалён от центра: а) на 20 см; б) на 2 м?
 18. Тонкий стержень длиной 10 см равномерно заряжен. Линейная плотность заряда 1 мкКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии 20 см от ближайшего его конца находится точечный заряд 100 нКл. Определить силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда.
 19. Тонкое полукольцо радиусом 20 см несёт равномерно распределённый заряд 2 мкКл. Определить силу, действующую на точечный заряд 40 нКл, расположенный в центре кривизны полукольца.
 20. Электрическое поле создано двумя точечными зарядами 40 нКл и 10 нКл, находящимися на расстоянии 10 см друг от друга. Определить напряжённость поля в точке, удалённой от первого заряда на 12 см и от второго на 6 см.
 21. Бесконечно длинная тонкостенная металлическая труба радиусом 2 см несёт равномерно распределённый по поверхности заряд. Поверхностная плотность заряда 1 нКл/м². Определить напряжённость поля в точках, отстоящих от оси трубы на расстояниях 1 см и 3 см. Построить график зависимости напряжённости от расстояния.
 22. На бесконечном тонкостенном цилиндре диаметром 20 см равномерно распределён заряд с поверхностной плотностью 4 мкКл/м². Определить напряжённость поля в точке, отстоящей от поверхности цилиндра на 15 см.
 23. Две параллельные бесконечно длинные прямые нити несут заряд, равномерно распределённый по длине с плотностями 0.1 мкКл/м и 0.2 мкКл/м. Определить силу взаимодействия, приходящуюся на отрезок нити длиной 1 м. Расстояние между нитями 10 см.
 24. Поверхностная плотность заряда бесконечно протяжённой вертикальной плоскости равна 400 мкКл/м². К плоскости на нити подвешен заряженный шарик массой 10 г. Определить заряд шарика, если нить образует с плоскостью угол 30°.
 25. Определить напряжённость поля, создаваемого зарядом, равномерно распределённым по тонкому прямому стержню с линейной плотностью 200 нКл/м, в точке, лежащей на продолжении оси стержня на расстоянии 20 см от ближайшего конца. Длина стержня 40 см.

26. Тонкое кольцо радиусом 10 см несет равномерно распределенный заряд 0.2 мкКл. Определить напряженность электрического поля, создаваемого этим зарядом в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние 20 см.
27. Четверть тонкого кольца радиусом 10 см несет равномерно распределенный заряд 0.05 мкКл. Определить напряженность электрического поля, создаваемого этим зарядом в точке, совпадающей с центром кольца.
28. Точечный заряд величиной 25 нКл находится в поле, созданном прямым бесконечным цилиндром радиусом 9 см, равномерно заряженным с поверхностной плотностью заряда 0.4 нКл/м². Определить силу, действующую на заряд, если он удален на расстояние 25 см от оси цилиндра.
29. Длинный парафиновый цилиндр радиусом 2 см несёт заряд, равномерно распределённый по объёму с плотностью 10 нКл/м³. Определить напряжённость электрического поля и величину вектора электрического смещения в точках, находящихся от оси цилиндра на расстояниях: а) 1 см; б) 3 см. Обе точки равноудалены от концов цилиндра. Построить график зависимости напряжённости и смещения от расстояния.
30. Имеются две металлические концентрические сферы радиусами 3 см и 6 см. Пространство между сферами заполнено парафином с диэлектрической проницаемостью 2. Заряд внутренней сферы равен $q_1 = -1$ нКл, внешней – $q_2 = 2$ нКл. Найти напряженность электрического поля на расстояниях 1 см, 5 см, 9 см от центра сфер.

2. Энергия взаимодействия точечных зарядов. Работа в электростатическом поле. Потенциал

$$W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r} \text{ – энергия взаимодействия точечных зарядов}$$

$$\varphi = \frac{W}{q} \text{ – определение потенциала}$$

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r} \text{ – потенциал поля точечного заряда}$$

$$\varphi = \sum_i \varphi_i, \quad \varphi = \int d\varphi \text{ – принцип суперпозиции}$$

$$W = \frac{1}{2} \sum_i (q_i \varphi_i) \text{ – потенциальная энергия системы точечных зарядов}$$

$$\Delta A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = -q \cdot \Delta\varphi \text{ – работа поля по перемещению заряда}$$

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi, \quad E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\int_1^2 \vec{E} d\vec{l} \text{ – связь напряженности и потенциала}$$

Примеры решения задач

Задача 3

Определить потенциал поля, создаваемого зарядом, равномерно

распределённым по тонкому прямому стержню с линейной плотностью 200 нКл/м, в точке, лежащей на перпендикуляре, восстановленном в одном из концов стержня, на расстоянии 40 см от него. Длина стержня 30 см.

Решение

Дано:
 $\tau = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл/м
 $l = 0.3$ м
 $b = 0.4$ м

Найти:
 $\varphi = ?$

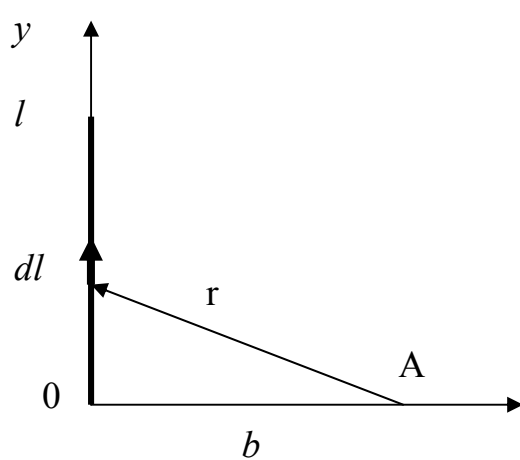


Рис.3

Разобьем стержень на бесконечно малые элементы $dl = dy$; y – координата данного элемента (рис.3). Заряд элемента $dq = \tau dy$ можно считать точечным. Потенциал поля, созданного зарядом dq в точке А на расстоянии r от заряда, равен:

$$d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r} = \frac{\tau dy}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (1)$$

где

$$r = \sqrt{b^2 + y^2} \quad (2)$$

По принципу суперпозиции полный потенциал

$$\varphi = \int d\varphi. \quad (3)$$

Интегрирование ведется по всей длине стержня. Тогда

$$\varphi = \int_0^l \frac{\tau dy}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{b^2 + y^2}} = k\tau \left(-\ln \left(\sqrt{b^2 + y^2} - y \right) \right) \Big|_0^l = k\tau \ln \frac{b}{\sqrt{b^2 + l^2} - l}$$

$$\varphi = k\tau \ln \frac{b}{\sqrt{b^2 + l^2} - l} \quad (4)$$

Здесь $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. Константа $k\tau$ вынесена за знак интеграла и использовано, что

первообразной функцией для функции $\frac{1}{\sqrt{b^2 + y^2}}$ является $\left(-\ln \left(\sqrt{b^2 + y^2} - y \right) \right)$,

в чем можно убедиться дифференцированием:

$$\begin{aligned} \left(-\ln \left(\sqrt{b^2 + y^2} - y \right) \right)' &= -\frac{\frac{2y}{2\sqrt{b^2 + y^2}} - 1}{\sqrt{b^2 + y^2} - y} = -\frac{\left(\frac{y}{\sqrt{b^2 + y^2}} - 1 \right) \sqrt{b^2 + y^2}}{\left(\sqrt{b^2 + y^2} - y \right) \sqrt{b^2 + y^2}} = \\ &= -\frac{y - \sqrt{b^2 + y^2}}{\left(\sqrt{b^2 + y^2} - y \right) \sqrt{b^2 + y^2}} = \frac{1}{\sqrt{b^2 + y^2}} \end{aligned}$$

По формуле (4) вычисляем потенциал:

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{0.4}{\sqrt{0.4^2 + 0.3^2} - 0.3} = 1250 \text{ В.}$$

Ответ: $\varphi=1250 \text{ В.}$

Задача 4

На двух коаксиальных бесконечных цилиндрах радиусами 5 см и 10 см равномерно распределены заряды с линейными плотностями заряда $\tau_1=100 \text{ нКл/м}$ и $\tau_2=-50 \text{ нКл/м}$ соответственно. Пространство между цилиндрами заполнено парафином с диэлектрической проницаемостью 2. Найти разность потенциалов цилиндров.

Решение

Дано: $\tau_1=100 \text{ нКл/м}$ $\tau_2=-50 \text{ нКл/м}$ $R_1=0.05 \text{ м}$ $R_2=0.1 \text{ м}$ $\varepsilon=2$	Воспользуемся результатами, полученными в задаче 2: напряженность электростатического поля между цилиндрами, при $R_1 < r < R_2$, вычисленная по теореме Гаусса, равна:
	$E = \frac{\tau_1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r} = \frac{2k\tau_1}{\varepsilon \cdot r}. \quad (1)$
Найти: $\Delta\varphi=?$	По формуле связи между напряженностью и потенциалом

$$\Delta\varphi = \int_{R_1}^{R_2} \vec{E} d\vec{l}, \quad (2)$$

где интеграл удобнее брать по силовой линии поля, так что $\vec{E} d\vec{l} = E dl \cos \alpha = E dl = E dr$, так как направление напряженности $\vec{E}$ совпадает с направлением радиус-вектора $\vec{r}$ и элемента длины контура интегрирования $d\vec{l} = d\vec{r}$, $\alpha=0$. Подставив (1) в (2), получим:

$$\Delta\varphi = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2k\tau_1}{\varepsilon \cdot r} dr = \frac{2k\tau_1}{\varepsilon} (\ln r) \Big|_{R_1}^{R_2} = \frac{2k\tau_1}{\varepsilon} (\ln R_2 - \ln R_1) = \frac{2k\tau_1}{\varepsilon} \ln \frac{R_2}{R_1},$$

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-7}}{2} \ln \frac{0.1}{0.05} = 624 \text{ В.}$$

Ответ: $\Delta\varphi=624 \text{ В.}$

31. Заряды 1 мкКл и -1 мкКл находятся на расстоянии 10 см. Определить напряженность и потенциал поля в точке, удалённой на расстояние 10 см от первого заряда и лежащей на линии, проходящей через первый заряд перпендикулярно направлению от первого заряда ко второму.
32. Тонкий стержень согнут в кольцо радиусом 10 см. Он равномерно заряжен с линейной плотностью заряда 800 нКл/м. Определить потенциал в точке, расположенной на оси кольца на расстоянии 10 см от его центра.
33. Имеются две металлические концентрические сферы радиусами 3 см и 6 см. Заряд внутренней сферы равен $q_1=-1 \text{ нКл}$, внешней – $q_2=2 \text{ нКл}$. Найти

- потенциал электрического поля на расстояниях 1 см, 5 см, 9 см от центра сфер.
34. Тонкому проволочному кольцу радиусом 1 м сообщен заряд -40 нКл. В центре кольца покоится электрон. При освобождении электрона он движется, удаляясь от неподвижного кольца. Какую наибольшую величину скорости может иметь электрон?
 35. Определить потенциал электрического поля в точке, удалённой от зарядов $q_1 = -0.2$ мкКл и $q_2 = 0.5$ мкКл на расстояния 15 и 25 см соответственно.
 36. Положительно заряженная частица, заряд которой равен элементарному заряду, прошла ускоряющую разность потенциалов 60 кВ и летит на ядро атома лития, заряд которого равен трём элементарным зарядам. На какое минимальное расстояние частица может приблизиться к ядру? Начальное расстояние частицы от ядра можно считать практически бесконечно большим, а массу частицы – пренебрежимо малой по сравнению с массой ядра.
 37. Точечные заряды 1 мкКл и 0.1 мкКл находятся на расстоянии 10 см друг от друга. Какую работу совершат силы поля, если второй заряд, отталкиваясь от первого, удалится от него на расстояние: а) 100 см; б) бесконечность?
 38. Три точечных заряда 3 мкКл, 5 мкКл и -6 мкКл находятся в вершинах треугольника со сторонами 30, 50 и 60 см. Определить работу, которую надо совершить, чтобы развести эти заряды на такое расстояние, на котором силами их взаимодействия можно пренебречь.
 39. Найти взаимную потенциальную энергию системы четырех зарядов по 20 нКл каждый, расположенных в вершинах квадрата со стороной 10 см. Какую работу надо совершить, чтобы развести эти заряды на такое расстояние, на котором силами их взаимодействия можно пренебречь?
 40. Найти взаимную потенциальную энергию системы трех зарядов по 20 нКл каждый, расположенных в вершинах квадрата со стороной 10 см. Какую работу надо совершить, чтобы развести эти заряды на такое расстояние, на котором силами их взаимодействия можно пренебречь?
 41. Две параллельные заряженные плоскости, поверхностные плотности зарядов которых 0.2 мкКл/м² и -0.3 мкКл/м², находятся на расстоянии 60 см друг от друга. Определить разность потенциалов между плоскостями.
 42. Электрическое поле создано длинным цилиндром радиусом 1 см, равномерно заряженным с линейной плотностью заряда 20 нКл/м. Определить разность потенциалов двух точек поля, находящихся на расстоянии 0.5 см и 2 см от поверхности цилиндра на одной линии напряженности.
 43. Тонкий стержень согнут в полукольцо радиусом 10 см. Стержень заряжен с линейной плотностью заряда 133 нКл/м. Какую работу нужно совершить, чтобы перенести заряд 6.7 нКл из центра полукольца в бесконечность?
 44. Тонкий стержень согнут в кольцо радиусом 10 см. Он заряжен с линейной плотностью заряда 300 нКл/м. Какую работу нужно совершить, чтобы перенести заряд 5 нКл из центра кольца в точку, расположенную на оси кольца в 20 см от его центра?

45. Две параллельные плоскости, заряженные с поверхностными плотностями 2 мкКл/м^2 и 0.8 мкКл/м^2 , находятся на расстоянии 0.6 см друг от друга. Определить разность потенциалов между плоскостями.
46. Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстоянии 1 см друг от друга. Плоскости несут равномерно распределённые по поверхности заряды с плотностями 0.2 мкКл/м^2 и 0.5 мкКл/м^2 . Найти разность потенциалов пластин.
47. Напряжённость однородного электрического поля в некоторой точке равна 600 В/м . Вычислить разность потенциалов между этой точкой и другой, лежащей на прямой, составляющей угол 60° с направлением вектора напряжённости. Расстояние между точками равно 2 мм .
48. Бесконечная плоскость равномерно заряжена с поверхностной плотностью 4 нКл/м^2 . Определить значение и направление градиента потенциала электрического поля, созданного этой плоскостью.
49. Электрическое поле создано положительным точечным зарядом. Потенциал поля в точке, удалённой от заряда на 12 см , равен 24 В . Определить значение и направление градиента потенциала в этой точке.
50. Бесконечная тонкая прямая нить несёт равномерно распределённый по длине нити заряд с линейной плотностью 1 нКл/м . Каков градиент потенциала в точке, удалённой на 10 см от нити? Указать направление градиента потенциала.
51. Два электрона, находящиеся на большом расстоянии друг от друга сближаются с относительной начальной скоростью 10 Мм/с . Определить минимальное расстояние, на которое они могут сблизиться.
52. Определить потенциал электрического поля в центре кольца с внешним диаметром 80 см и внутренним диаметром 40 см , если на нем равномерно распределен заряд 600 нКл .
53. Тонкая нить длиной 80 см заряжена с линейной плотностью 2 нКл/м . Определить потенциал электростатического поля в точке, находящейся на расстоянии 20 см от середины нити и равноудаленной от ее концов.
54. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины к другой, приобрёл скорость 10^5 м/с . Расстояние между пластинами 8 мм . Найти разность потенциалов между пластинами и поверхностную плотность заряда на пластинах.
55. Протон с начальной скоростью 100 км/с влетел в однородное поле напряжённостью 300 В/см так, что вектор скорости совпал с направлением линии напряжённости. Какой путь должен пройти протон в направлении линий поля, чтобы его скорость удвоилась?
56. Бесконечная плоскость заряжена отрицательно с поверхностной плотностью 35.4 нКл/м^2 . По направлению силовой линии поля, созданного плоскостью, летит электрон. Определить минимальное расстояние, на которое может подойти электрон к плоскости, если на расстоянии 5 см он имел кинетическую энергию 80 эВ .
57. Электрон с начальной скоростью 3 Мм/с влетел в однородно электрическое поле напряжённостью 150 В/м . Вектор начальной скорости перпендикулярен

- линиям напряжённости. Найти: а) силу, действующую на электрон; б) ускорение, приобретаемое электроном; в) скорость электрона через 0.1 мкс.
58. Узкий пучок электронов, обладающих энергией 1600 эВ, проходит в вакууме посередине между пластинами плоского конденсатора. Какое минимальное напряжение необходимо подвести к пластинам, чтобы электроны не вышли за пределы конденсатора? Длина пластин 0.3 м, расстояние между ними 1 см.
59. Электрон влетает в плоский конденсатор параллельно его пластинам со скоростью 1000 км/с. Длина пластин 9 см, расстояние между ними 1.6 см, разность потенциалов 10 В. Какой скоростью обладает электрон при вылете из конденсатора? Каково направление этой скорости?
60. Электрон влетел в конденсатор на равном расстоянии от пластин со скоростью 10 Мм/с параллельно пластинам. При вылете угол между первоначальной и конечной скоростями 30° . Определить напряжение на конденсаторе и напряжённость электростатического поля конденсатора. Расстояние между обкладками конденсатора 2 см, их длина 10 см.

3. Поляризация диэлектриков. Проводники. Конденсаторы. Емкость.

Энергия электростатического поля

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

$\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{E}]$ – момент силы, действующий на диполь в электрическом поле

$\vec{P} = \frac{\sum \vec{P}_{\text{молекул}}}{\Delta V}$, $\vec{P} = \epsilon_0 \aleph \vec{E}$ – поляризованность (вектор поляризации) диэлектрика

$\epsilon = 1 + \aleph$, где $\aleph$ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика

$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ – вектор электрического смещения

$C = \frac{q}{\varphi}$, $C = \frac{q}{U}$ – определение емкости проводника, конденсатора

$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$ – емкость шара

$E = \frac{U}{d}$ – связь между напряженностью поля и напряжением на конденсаторе

$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$ – емкость плоского конденсатора

$C = \sum_i C_i$ – общая емкость при параллельном соединении конденсаторов

$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}$ – общая емкость при последовательном соединении конденсаторов

$\Delta W = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = -q \cdot \Delta\varphi$ – энергия, приобретённая частицей в электрическом поле

$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2}$ – энергия заряженного проводника

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} - \text{энергия заряженного конденсатора}$$

$\vec{F} = -\text{grad}W_{\text{ном.}}$ – связь между консервативной силой и потенциальной энергией

$w = \frac{dW}{dV}$ – определение объемной плотности энергии поля

$w = \frac{ED}{2}$ – объемная плотность энергии электростатического поля

Примеры решения задач

Задача 5

Дано:

E_0

ε

Найти:

$\sigma'=?$

$E=?$

$E'=?$

$D=?$

$P=?$

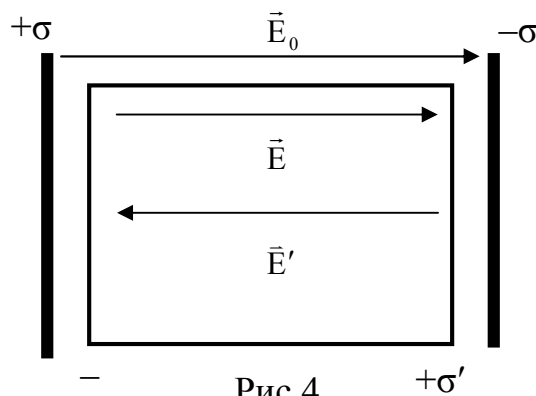


Рис.4

Напряженность поля воздушного конденсатора, заряженного и отключенного от источника, равна E_0 . В конденсатор параллельно обкладкам поместили пластину диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε . Найти поверхностную плотность

связанных зарядов на гранях диэлектрика, выразить ее через поверхностную плотность свободных зарядов на обкладках конденсатора; найти напряженность поля в диэлектрике, а также напряженность поля, созданного только связанными зарядами; значение вектора электрического смещения и поляризованности диэлектрика.

Решение

Напряженность поля в диэлектрике уменьшается по сравнению с напряженностью в вакууме в ε раз, поэтому

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}. \quad (1)$$

Суммарное (полное) поле в диэлектрике складывается из поля свободных зарядов $\vec{E}_0$ и связанных (индуцированных) $\vec{E}'$: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$, но $\vec{E}_0$ и $\vec{E}'$ направлены противоположно (см. рис.4), поэтому $E = E_0 - E'$,

$$E' = E_0 - E = E_0 - \frac{E_0}{\varepsilon} = E_0 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) = \frac{E_0(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Напряженность поля связанных зарядов можно выразить через поверхностную плотность связанных зарядов (напряженность поля конденсатора):

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}, \quad (3)$$

тогда с учетом (2):

$$\sigma' = \varepsilon_0 E' = \frac{\varepsilon_0 E_0 (\varepsilon - 1)}{\varepsilon}. \quad (4)$$

Аналогично, напряженность поля только свободных зарядов $E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$, тогда из (4):

$$\sigma' = \frac{\sigma(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Вектор электрического смещения $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$, поэтому

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{E_0}{\varepsilon} = \varepsilon_0 E_0. \quad (6)$$

Далее, так как $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ и векторы $\vec{D}$, $\vec{E}$ и $\vec{P}$ направлены одинаково, то:

$$P = D - \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 (E_0 - E) = \varepsilon_0 \left(E_0 - \frac{E_0}{\varepsilon} \right) = \varepsilon_0 E_0 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) = \frac{\varepsilon_0 E_0 (\varepsilon - 1)}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Можно выполнить проверку (7): по определению вектор поляризации равен суммарному дипольному моменту единицы объема вещества:

$$\vec{P} = \frac{\sum_i \vec{p}_{\text{молекул}}}{\Delta V}, \quad (8)$$

а дипольный момент пластины диэлектрика равен произведению связанного заряда, локализованного на одной из граней $q' = \sigma' S$, на плечо диполя – толщину пластины d , тогда

$$P = \frac{q' d}{\Delta V} = \frac{\sigma' d S}{\Delta V} = \sigma', \quad (9)$$

так как объем пластины $\Delta V = S d$. Из (4) и (9) получаем (7).

$$\text{Ответ: } \sigma' = \frac{\varepsilon_0 E_0 (\varepsilon - 1)}{\varepsilon}; \quad \sigma' = \frac{\sigma(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}; \quad E = \frac{E_0}{\varepsilon}; \quad E' = \frac{E_0 (\varepsilon - 1)}{\varepsilon}; \quad D = \varepsilon_0 E_0;$$

$$P = \frac{\varepsilon_0 E_0 (\varepsilon - 1)}{\varepsilon}.$$

Задача 6

Два одинаковых плоских воздушных конденсатора ёмкостью по 100 пФ каждый соединены в батарею последовательно. Определить, на сколько изменится ёмкость батареи, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить парафином с диэлектрической проницаемостью 2.

Дано: $C_0 = 100$ пФ $\varepsilon = 2$	Решение
	Общую ёмкость при последовательном соединении конденсаторов C_1 и C_2 можно найти из формулы:
Найти: $\Delta C = ?$	$\frac{1}{C_{\text{общ.}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$. Поэтому общая ёмкость батареи, состоящей из

двух одинаковых конденсаторов ёмкостью C_0 (до заполнения одного из конденсаторов парафином) равна: $C_{общ.1} = \frac{C_0 \cdot C_0}{C_0 + C_0} = \frac{C_0}{2}$. После заполнения

парафином одного из конденсаторов его ёмкость $C_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$, а до заполнения была равна $C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$, то есть ёмкость возросла в ε раз: $C_1 = \varepsilon \cdot C_0$. Найдём новую

общую ёмкость батареи: $C_{общ.2} = \frac{C_0 \cdot C_1}{C_0 + C_1} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon \cdot C_0}{C_0 + \varepsilon \cdot C_0} = \frac{\varepsilon \cdot C_0}{1 + \varepsilon}$. Таким образом,

изменение ёмкости батареи равно: $\Delta C = C_{общ.2} - C_{общ.1} = C_0 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} - \frac{1}{2} \right)$.

Подставим численные значения: $\Delta C = 100 \text{ нФ} \cdot \left(\frac{2}{1 + 2} - \frac{1}{2} \right) = 16.7 \text{ нФ}$.

Ответ: $\Delta C = 16.7 \text{ нФ}$.

Задача 7

Электрическое поле создано заряженной ($Q=0.2$ мкКл) металлической сферой радиусом 5 см. Какова энергия поля, заключенного в сферическом слое, ограниченном сферой и концентрической с ней сферической поверхностью, радиус которой в 3 раза больше радиуса сферы?

Дано:
 $Q=2 \cdot 10^{-7}$ Кл
 $R_0=0.05$ м
 $R=0.15$ м

Найти:
 $W=?$

Решение:

Энергию поля, заключенную в сферическом слое, будем находить через объемную плотность энергии, равную по определению

$$w = \frac{dW}{dV}, \quad (1)$$

а для энергии электростатического поля

$$w = \frac{ED}{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (2)$$

Напряженность электростатического поля, созданного уединенной металлической заряженной сферой, вне этой сферы (при $r > R_0$) такая же, как и напряженность поля точечного заряда, находящегося в центре сферы:

$$E = \frac{Q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2}, \quad (3)$$

причем будем считать, что $\varepsilon=1$ (поле в вакууме).

Из (1) – (3) следует, что энергия, заключенная в любом малом объеме dV , равна:

$$dW = w dV = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} dV = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \left(\frac{Q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2} \right)^2}{2} dV = \frac{Q^2}{32\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r^4} dV. \quad (4)$$

Поскольку поле сферически симметрично, в качестве dV следует брать тонкий шаровой слой, концентрический данной сфере, с внутренним радиусом r , внешним радиусом $(r+dr)$, тогда в пределах этого слоя значение напряженности можно считать одинаковым и равным (3). Объем слоя можно найти, перемножив площадь сферы на его толщину, так как слой тонкий:

$$dV = 4\pi r^2 dr. \quad (5)$$

Наконец, искомую энергию находим, проинтегрировав (4) по объему, то есть в пределах $R_0 < r < R$:

$$\begin{aligned} W = \int w dV &= \int_{R_0}^R \frac{Q^2}{32\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r^4} 4\pi r^2 dr = \frac{Q^2}{8\pi \varepsilon \varepsilon_0} \int_{R_0}^{3R_0} \frac{dr}{r^2} = \frac{Q^2}{8\pi \varepsilon_0} \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_{R_0}^{3R_0} = \\ &= \frac{Q^2}{8\pi \varepsilon_0} \left(-\frac{1}{3R_0} + \frac{1}{R_0} \right) = \frac{Q^2}{12\pi \varepsilon_0 R_0}, \\ W &= \frac{(2 \cdot 10^{-7})^2}{12 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 0.05} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Ответ: $W=2.4$ мДж.

61. Диполь с электрическим моментом 100 пКл·м свободно установился в однородном электрическом поле напряженностью 200 кВ/м. Определить работу внешних сил, которую необходимо совершить для поворота диполя на угол 180° .
62. Диполь с электрическим моментом 100 пКл·м свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью 10 кВ/м. Определить изменение потенциальной энергии диполя при повороте его на угол 60° .
63. Какой максимальный момент силы действует в электрическом поле с напряженностью 20 кВ/м на молекулу воды, обладающую дипольным моментом $3.7 \cdot 10^{-29}$ Кл·м?
64. Одна часть плоского конденсатора заполнена водой, другая – глицерином (рис.5). Во сколько раз поверхностная плотность связанных зарядов одного диэлектрика больше, чем другого? Диэлектрическая проницаемость воды 81, глицерина – 43.
65. В результате однородной поляризации на концах диэлектрика возникли связанные заряды с поверхностной плотностью 10^{-10} Кл/м². Образец диэлектрика имеет форму цилиндра длиной 30 см и площадью поперечного сечения 1 см². Считая поляризованный диэлектрик диполем, найдите его электрический момент, а также напряженность электростатического поля в нем, его поляризованность и вектор электрического смещения. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна 3.
66. Определить потенциал электрического поля точечного диполя, электрический момент которого 0.02 пКл·м, в точке, лежащей на оси диполя на расстоянии 10 см от его центра со стороны положительного заряда.

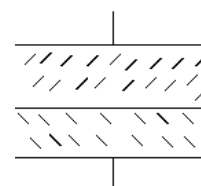


Рис.5

67. Поле образовано точечным диполем с электрическим моментом $200 \text{ пКл}\cdot\text{м}$. Определить разность потенциалов двух точек поля, расположенных симметрично относительно диполя на его оси на расстоянии 40 см от центра диполя.

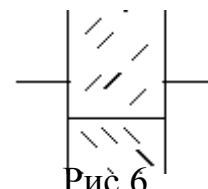


Рис.6

68. Одна часть плоского конденсатора заполнена водой, другая – глицерином (рис.6). Во сколько раз поверхностная плотность связанных зарядов одного диэлектрика больше, чем другого? Диэлектрическая проницаемость воды 81 , глицерина – 43 .
69. Два металлических шара радиусами 2 см и 6 см соединены проводником, емкостью которого можно пренебречь. Шарам сообщён заряд 1 нКл . Найти поверхностную плотность заряда на шарах.
70. Шар радиусом 6 см заряжен до потенциала 300 В , а шар радиусом 4 см до потенциала 500 В . Определить потенциал шаров после того, как их соединили металлическим проводником, ёмкостью которого можно пренебречь.
71. Определить потенциал, до которого можно зарядить уединённый металлический шар радиусом 10 см , если напряжённость поля, при которой происходит пробой воздуха, равна 3 МВ/м . Найти также максимальную поверхностную плотность электрических зарядов перед пробоем.
72. Металлический шарик диаметром 2 см заряжен отрицательно до потенциала 150 В . Сколько электронов находится на поверхности шарика?
73. Проводящий шарик радиусом 3 см , находящийся в вакууме, заряжен до потенциала 3 кВ . Определить заряд шарика и поверхностную плотность заряда на нем. Какую работу совершит электрическое поле для перемещения пробного заряда 2 нКл из точки, отстоящей от поверхности шарика на 12 см , в точку, расположенную на 10 см дальше, считая по линии напряженности?
74. Тысяча одинаковых наэлектризованных дождевых капель слились в одну. Во сколько раз увеличилась электрическая энергия капли по сравнению с общей энергией тысячи мелких капель?
75. Тысячу одинаковых заряженных капелек ртути соединяют в одну каплю. Определить потенциал большой капли, поверхностную плотность заряда на ней и изменение электрической энергии, если потенциал каждой мелкой капли 10 В , радиус – 1 мм . Все капли шарообразны и до соединения находились далеко друг от друга.
76. Четыре одинаковых капли ртути, заряженных до потенциала 10 В , сливаются в одну. Каков потенциал образовавшейся капли?
77. Два металлических шара имеют одинаковые заряды 1.0 нКл . После соединения шаров тонким проводником потенциал их стал равным 120 В . Определить радиус первого шара, если емкость второго 10 пкФ .

78. Конденсаторы с электроемкостями $C_1=0.2 \text{ мкФ}$, $C_2=0.1 \text{ мкФ}$, $C_3=0.3 \text{ мкФ}$, $C_4=0.4 \text{ мкФ}$ соединены так, как показано на рис.7. Определить электроемкость батареи конденсаторов.

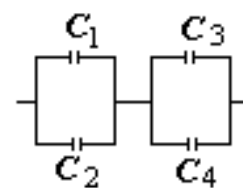


Рис.7

79. Два одинаковых плоских воздушных конденсатора

ёмкостью по 100 пФ каждый соединены в батарею последовательно. Определить, на сколько изменится ёмкость батареи, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить парафином с диэлектрической проницаемостью 2.

80. Конденсаторы с ёмкостями $C_1=0.2$ мкФ, $C_2=0.6$ мкФ, $C_3=0.3$ мкФ, $C_4=0.5$ мкФ соединены так, как показано на рис.8. Разность потенциалов между точками A и B равна 320 В. Определить разность потенциалов на пластинах каждого конденсатора.

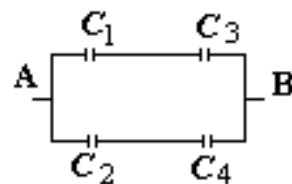


Рис.8

81. Два конденсатора ёмкостями 5 мкФ и 8 мкФ соединены последовательно и присоединены к батарее с ЭДС 80 В. Определить заряд каждого конденсатора и разность потенциалов между обкладками.

82. Конденсаторы с ёмкостями $C_1=2$ мкФ, $C_2=2$ мкФ, $C_3=3$ мкФ, $C_4=1$ мкФ соединены так, как показано на рис.9. Разность потенциалов на обкладках четвертого конденсатора 100 В. Найти заряды и разности потенциалов на обкладках каждого конденсатора, а также общий заряд и разность потенциалов батареи конденсаторов.

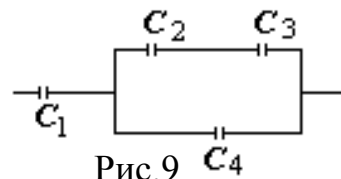


Рис.9

83. На пластинах плоского конденсатора равномерно распределён заряд с поверхностной плотностью 0.2 мкКл/м². Расстояние между пластинами 1 мм. На сколько изменится разность потенциалов на его обкладках при увеличении расстояния между ними до 3 мм?
84. Между пластинами плоского конденсатора находится плотно прилегающая стеклянная пластина с диэлектрической проницаемостью 7. Конденсатор заряжен до разности потенциалов 100 В. Какова будет разность потенциалов, если вытащить из него стеклянную пластину?
85. Обкладки плоского конденсатора изолированы друг от друга пластиной из диэлектрика. Конденсатор заряжен до разности потенциалов 1000 В. Определить диэлектрическую проницаемость материала пластины, если при ее удалении разность потенциалов между обкладками конденсатора возрастет до 3000 В.
86. Плоский конденсатор состоит из двух круглых пластин радиусом 10 см каждая. Расстояние между пластинами 2 мм. Конденсатор присоединен к источнику напряжения 80 В. Определить заряд и напряженность поля конденсатора в двух случаях: диэлектрик – воздух; диэлектрик – стекло ($\epsilon=6$).
87. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено двумя слоями диэлектрика: слоем стекла толщиной 2 мм и слоем парафина толщиной 3 мм. Напряжение на конденсаторе 300 В. Определить напряженность поля и падение потенциала в каждом из слоев.
88. Между пластинами плоского конденсатора, заряженного до разности потенциалов 600 В, находятся два слоя диэлектрика: стекло с диэлектрической проницаемостью 7 толщиной 7 мм и эбонит с

- диэлектрической проницаемостью 3 толщиной 3 мм. Площадь каждой пластины конденсатора 200 см^2 . Найти: а) электроёмкость конденсатора; б) напряжённость поля и падение потенциала в каждом слое.
89. Расстояние между пластинами плоского конденсатора равно 1.33 мм, площадь пластин 20 см^2 . В пространстве между пластинами находятся два слоя диэлектрика: слюда толщиной 0.7 мм с диэлектрической проницаемостью 7 и эбонит толщиной 0.3 мм с диэлектрической проницаемостью 3. Определить электроёмкость конденсатора.
90. Электроёмкость плоского конденсатора 1.5 мкФ, расстояние между обкладками 5 мм. Какова будет электроёмкость конденсатора, если на нижнюю обкладку положить лист эбонита с диэлектрической проницаемостью 3 и толщиной 3 мм?
91. Два одинаковых плоских воздушных конденсатора соединили последовательно в батарею, которая подключена к источнику с ЭДС 12 В. Определить, на сколько изменится напряжение на одном из конденсаторов, если другой погрузить в трансформаторное масло. Диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла 2.2.
92. В плоский конденсатор вдвинута пластинка парафина толщиной 1 см с диэлектрической проницаемостью 2. Пластинка вплотную прилегает к обкладкам. На сколько нужно увеличить расстояние между обкладками, чтобы получить прежнюю ёмкость?
93. Между обкладками плоского конденсатора параллельно им введена металлическая пластина толщиной 8 мм. Определить ёмкость конденсатора, если площадь каждой обкладки 100 см^2 , а расстояние между ними 10 мм.
94. В плоском конденсаторе находятся два слоя диэлектрика с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1=3$ и $\epsilon_2=2$. Толщина слоев $d_1=d_2=4$ мм. Конденсатор заряжен до разности потенциалов 100 В. Найти в каждом слое: напряжённость E электростатического поля; вектор электрического смещения D ; поляризованность P диэлектрика; разность потенциалов $\Delta\phi$.
95. Два проводящих шара, радиусы которых 10 см и 25 см, имели электрические заряды 2 нКл и 5 нКл соответственно. Каким будет потенциал шаров после их соединения очень тонким проводником?
96. Сто одинаковых капель ртути, заряженных до потенциала 20 В, сливаются в одну большую каплю. Каков потенциал образовавшейся капли?
97. Металлический шар радиусом 10 см заряжен до потенциала 300 В. Определить потенциал этого шара в двух случаях: а) после того, как окружат его сферической проводящей оболочкой радиусом 15 см и на короткое время соединят с ней проводником; б) если его окружить сферической проводящей заземлённой оболочкой радиусом 15 см.
98. Два металлических шарика радиусами 5 см и 10 см имеют 40 нКл и -20 нКл соответственно. Найти энергию, которая выделится при разрядке, если шары соединить проводником.
99. Шару радиусом 10 см сообщен заряд 80 нКл, равномерно распределенный по поверхности шара. Определить энергию поля, созданного шаром в вакууме.

100. Три конденсатора, электрические емкости которых 3, 6 и 9 мкФ, соединены последовательно и подсоединены к источнику постоянного напряжения 220 В. Определить электрическую емкость батареи, общий заряд, заряды на каждом конденсаторе, напряжение на каждом конденсаторе и энергию, запасенную батареей.
101. Три конденсатора, электрические емкости которых 3, 6 и 9 мкФ, соединены параллельно и подсоединены к источнику постоянного напряжения 220 В. Определить электрическую емкость батареи, общий заряд, заряды на каждом конденсаторе, напряжение на каждом конденсаторе и энергию, запасенную батареей.
102. Плоский конденсатор состоит из двух круглых пластин радиусом 10 см каждая. Расстояние между пластинами 1 см. Конденсатор зарядили до разности потенциалов 1.2 кВ и отключили от источника тока. Какую работу нужно совершить, чтобы, удаляя пластины друг от друга, увеличить расстояние между ними до 3.5 см?
103. Плоский воздушный конденсатор электроёмкостью 1.11 пФ заряжен до разности потенциалов 300 В. После отключения от источника тока расстояние между пластинами было увеличено в 5 раз. Определить: а) разность потенциалов на обкладках конденсатора после их раздвижения; б) работу внешних сил по раздвижению пластин.
104. Конденсатор ёмкостью 666 пФ зарядили до разности потенциалов 1.5 кВ и отключили от источника тока. Затем к нему присоединили параллельно второй незаряженный конденсатор ёмкостью 444 пФ. Определить энергию, израсходованную на образование искры, проскочившей при соединении конденсаторов.
105. Какое количество теплоты выделится при разрядке плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами равна 15 кВ, расстояние 1 мм, диэлектрик – слюда с диэлектрической проницаемостью 7 и площадь каждой пластины 300 см^2 ?
106. Электроёмкость плоского конденсатора равна 111 пФ. Диэлектрик – фарфор с диэлектрической проницаемостью 5. Конденсатор зарядили до разности потенциалов 600 В и отключили от источника напряжения. Какую работу нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из конденсатора (трением пренебречь)?
107. Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин 100 см^2 присоединён к источнику с напряжением 300 В. Какую работу нужно совершить, чтобы увеличить расстояние между обкладками с 3 мм до 6 мм?
108. Конденсатор емкостью 3 мФ был заряжен до разности потенциалов 40 В. После отключения от источника тока к конденсатору подключили параллельно другой незаряженный конденсатор емкостью 5 мФ. Какое количество энергии первого конденсатора израсходуется на образование искры в момент присоединения?
109. Определить работу, которую надо затратить, чтобы увеличить на 2 мм расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора, заряд которого 20 мкКл. Площадь пластины 40 см^2 .

110. Расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора площадью 50 см^2 изменяется от 3 мм до 10 мм. Конденсатор заряжен до 200 В и отключен от источника. Найти изменение энергии поля конденсатора. Чему равна работа по раздвижению пластин?
111. Расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора площадью 50 см^2 изменяется от 3 мм до 10 мм. Конденсатор подключен к источнику напряжения 200 В. Найти изменение энергии поля конденсатора. Чему равна работа по раздвижению пластин?
112. Расстояние между пластинами плоского конденсатора равно 2 см, разность потенциалов 6 кВ, заряд каждой пластины 10 нКл. Вычислить энергию поля конденсатора и силу взаимного притяжения пластин.
113. Найти силу притяжения между пластинами плоского конденсатора, если площадь пластин 40 см^2 , расстояние между ними 10 мм. Диэлектрик – стекло с диэлектрической проницаемостью 6. Расчет провести для случая, когда конденсатору сообщен заряд 40 мКл, после чего он отключен от источника постоянного напряжения.
114. Две круглые металлические пластины радиусом 10 см каждая, заряженные разноименно, расположены одна против другой параллельно друг другу и притягиваются с силой 2 мН. Расстояние между пластинами равно 1 мм. Определить разность потенциалов между пластинами.
115. Две одинаковые круглые пластины площадью 400 см^2 каждая расположены параллельно друг другу. Заряд одной пластины 400 нКл, другой – $(-200) \text{ нКл}$. Определить силу взаимного притяжения пластин в случаях, когда расстояние между ними: а) 3 мм; б) 10 м.
116. Сила взаимного притяжения между пластинами плоского воздушного конденсатора равна 50 мН. Площадь каждой пластины 200 см^2 . Найти плотность энергии поля конденсатора.
117. Плоский конденсатор с площадью пластин 200 см^2 каждая заряжен до разности потенциалов 2 кВ. Расстояние между пластинами 2 см. Диэлектрик – стекло с диэлектрической проницаемостью 7. Определить энергию поля конденсатора и плотность энергии поля.
118. Две концентрические сферические поверхности, находящиеся в вакууме, заряжены одинаковым положительным зарядом 3 мКл. Радиусы сфер 1 м и 2 м. Найти энергию электрического поля, заключенного между этими сферами.
119. Пластину из эбонита толщиной 2 мм и площадью 300 см^2 поместили в однородное электрическое поле напряженностью 1 кВ/м, расположив так, что силовые линии перпендикулярны её плоской поверхности. Найти: а) плотность связанных зарядов на поверхности пластин; б) энергию электрического поля, сосредоточенную в пластине.
120. Уединённая металлическая сфера ёмкостью 10 пФ заряжена до 3 кВ. Определить энергию поля, заключенного в сферическом слое, ограниченном сферой и концентрической с ней сферической поверхностью, радиус которой равен трём радиусам сферы.

4. Электрический ток. Законы Ома, Кирхгофа и Джоуля-Ленца

$$I = \frac{dq}{dt} - \text{определение силы тока}$$

$$\Delta q = \int_0^t Idt - \text{заряд, прошедший через сечение проводника}$$

$$j = \frac{dI}{dS} - \text{определение плотности тока}$$

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} - \text{сила тока через сечение } S$$

$$\vec{j} = q_0 n \vec{v} - \text{плотность тока при направленном движении заряженных частиц}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} - \text{закон Ома в локальной форме}$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} - \text{связь удельной электропроводимости и удельного сопротивления}$$

$$R = \rho \frac{l}{S} - \text{сопротивление проводника}$$

$$R = \sum_i R_i - \text{общее сопротивление при последовательном соединении}$$

$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i} - \text{общее сопротивление при параллельном соединении}$$

$$I = \frac{U}{R} - \text{закон Ома для однородного участка цепи}$$

$$U = \Delta\phi + \mathcal{E} - \text{напряжение на неоднородном участке цепи}$$

$$\mathcal{E} = \frac{dA_{\text{смор.}}}{dq} - \text{определение электродвижущей силы}$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} - \text{закон Ома для замкнутой цепи}$$

$$\sum_i I_i = 0 - \text{первое правило Кирхгофа (для узла)}$$

$$\sum_i (I_i R_i) = \sum_k \mathcal{E}_k - \text{второе правило Кирхгофа (для замкнутого контура)}$$

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot t) - \text{зависимость сопротивления металла от температуры}$$

$$P = I^2 R = UI = \frac{U^2}{R} - \text{полезная мощность тока}$$

$$P = I \cdot \mathcal{E} - \text{полная мощность источника}$$

$$dQ = UI dt, \quad \Delta Q = \int_0^t UI dt = \int_0^t I^2 R dt - \text{закон Джоуля-Ленца}$$

$$w = \frac{dQ}{\Delta V dt} - \text{определение удельной тепловой мощности тока}$$

$$w = \rho j^2 = \gamma E^2 = jE - \text{закон Джоуля-Ленца в локальной форме}$$

Ток в жидкости и газе. Термоэлектронная эмиссия

$\gamma = \alpha \cdot n \cdot z \cdot e \cdot (u_+ + u_-)$ – удельная электропроводимость раствора электролита

$u_+ = \frac{v_+}{E}, u_- = \frac{v_-}{E}$ – подвижности ионов

$j = \gamma E$, – плотность тока, далекого от насыщения, в газе (закон Ома), где удельная электропроводимость газа равна $\gamma = ne(u_+ + u_-)$

$j_{нас.} = n_i q_0 d$ – плотность тока насыщения в газе

$j_{нас.} = BT^2 \exp(-\frac{A_{вых.}}{kT})$ – плотность тока насыщения при термоэлектронной эмиссии (формула Ричардсона – Дешмена)

$I_a = CU^{3/2}$ – закон «трех вторых» (Ленгмюра и Богуславского)

Примеры решения задач

Задача 8

Определить силу тока в сопротивлении R_3 и напряжение на концах этого сопротивления (рис.10). $\mathcal{E}_1 = 1$ В, $\mathcal{E}_2 = 5$ В, $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 3$ Ом.

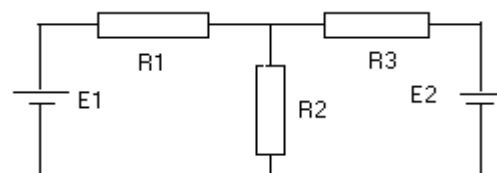


Рис.10

Решение:

Дано:

$\mathcal{E}_1 = 1$ В

$\mathcal{E}_2 = 5$ В

$R_1 = 1$ Ом

$R_2 = 2$ Ом

$R_3 = 3$ Ом

Найти:

$I_3 = ?$

$U_3 = ?$

Для решения задачи используем правила Кирхгофа. В первую очередь выберем направления токов во всех ветвях цепи (в данной задаче их три) и проставим обозначения токов (см. рис.11). В цепи два узла (b и e), следовательно, по первому правилу должно быть записано одно уравнение (на одно меньше, чем количество узлов): $\sum_i I_i = 0$ – алгебраическая сумма токов,

сходящихся в узле, равна нулю. Запишем это правило для узла b:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0, \quad (1)$$

причем токи, заходящие в узел, берем с положительным знаком, выходящие – с отрицательным.

По второму правилу Кирхгофа записываем два оставшихся уравнения (всего уравнений столько же, сколько токов):

$\sum_i (I_i R_i) = \sum_k \mathcal{E}_k$ – алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях в

любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме электродвижущих сил. Здесь также нужно соблюдать правила знаков: если направление обхода контура на данном участке противоположно направлению тока, то падение напряжения берем с отрицательным знаком; если ЭДС проходим от плюса к минусу, то берем ее с отрицательным знаком.

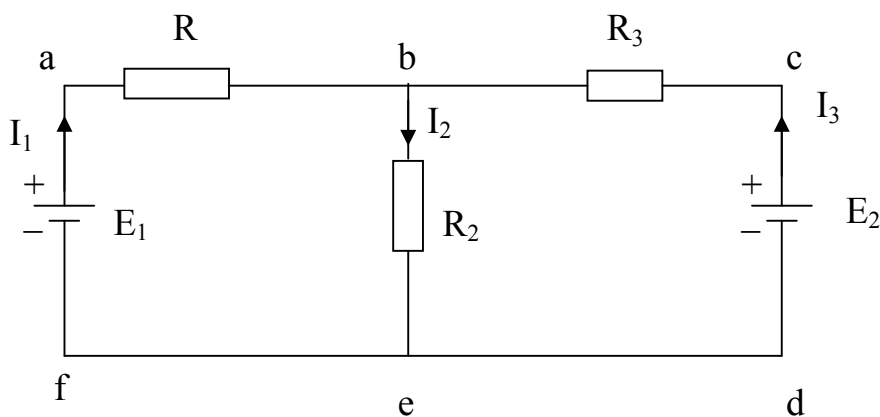


Рис.11

Таким образом, получим для контуров abef и abcdef:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = \mathcal{E}_1 \quad (2)$$

$$I_1 R_1 - I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2. \quad (3)$$

Решаем систему уравнений (1) – (3); из (1) получим:

$$I_2 = I_1 + I_3, \quad (4)$$

После подстановки (4) в (2) и замены в (2) и (3)

известных величин на их численные значения:

$$3I_1 + 2I_3 = 1, \quad (5)$$

$$I_1 - 3I_3 = -4. \quad (6)$$

Из (4): $I_1 = 3I_3 - 4$, после подстановки в (5): $I_3 = \frac{13}{11} = 1.18 \text{ A}$, напряжение U_3

найдем по закону Ома для участка цепи: $U_3 = I_3 R_3 = 1.18 \cdot 3 = 3.55 \text{ В}$.

Ответ: $I_3 = 1.18 \text{ A}$; $U_3 = 3.55 \text{ В}$.

Задача 9

Сила тока в проводнике сопротивлением 12 Ом равномерно убывает от максимального значения до нуля за 10 с. Какое количество теплоты выделится в этом проводнике за указанный промежуток времени, если при этом по проводнику прошел заряд 50 Кл?

Решение:

Дано:
 $R = 12 \text{ Ом}$
 $t_0 = 10 \text{ с}$
 $\Delta q = 50 \text{ Кл}$

Найти:
 $Q = ?$

Запишем закон, по которому изменяется со временем сила тока в проводнике. Ток убывает равномерно, то есть по линейному закону, от максимального значения I_0 , тогда:

$$I = I_0 - kt, \quad (1)$$

где $k = -\frac{dI}{dt}$ – быстрота убывания тока:

$$k = \frac{I_0}{t_0}. \quad (2)$$

Заряд, прошедший через сечение, можно рассчитать, интегрируя силу тока по времени в рассматриваемом промежутке: так как $I = \frac{dq}{dt}$,

то

$$\Delta q = \int_0^{t_0} I dt = \int_0^{t_0} (I_0 - kt) dt = \left(I_0 t - k \frac{t^2}{2} \right) \Big|_0^{t_0} = I_0 t_0 - \frac{k t_0^2}{2},$$

с учетом (2):

$$\Delta q = I_0 t_0 - \frac{I_0 t_0^2}{2t_0} = \frac{I_0 t_0}{2} = \frac{k t_0^2}{2}. \quad (3)$$

Количество выделившейся теплоты находим по закону Джоуля-Ленца, подставив (1):

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{t_0} I^2 R dt = \int_0^{t_0} (I_0 - kt)^2 R dt = \int_0^{t_0} (I_0^2 - 2I_0 kt + k^2 t^2) R dt = \\ &= \left(I_0^2 t_0 - 2I_0 k \frac{t_0^2}{2} + k^2 \frac{t_0^3}{3} \right) R = \left(k^2 t_0^3 - k^2 t_0^3 + \frac{k^2 t_0^3}{3} \right) R = \frac{k^2 t_0^3}{3} R. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь учтено, что из (2) $I_0 = kt_0$.

$$\text{Из (3) } k = \frac{2\Delta q}{t_0^2}, \text{ тогда } Q = \left(\frac{2\Delta q}{t_0^2} \right)^2 \frac{t_0^3}{3} R = \frac{4(\Delta q)^2}{3t_0} R.$$

$$\text{Вычисляем: } Q = \frac{4(50)^2}{3 \cdot 10} 12 = 4000 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 4000$ Дж.

121. Определить среднюю скорость упорядоченного движения электронов в медном проводнике при силе тока 10 А и сечении проводника, равном 1 мм². Принять, что на каждый атом меди приходится два электрона проводимости. Плотность меди 8600 кг/м³.
122. При выключении источника тока сила тока в цепи убывает по закону: $I = 10 \cdot e^{-500t}$ (сила тока выражена в амперах, время – в секундах). Определить заряд, протекший через сечение проводника после выключения тока.
123. Сила тока в проводнике изменяется со временем по закону: $I = 20 \cdot e^{-100t}$ (сила тока выражена в амперах, время – в секундах). Определить заряд, протекший через сечение проводника за время 0.01 с.
124. Найти величину добавочного сопротивления, которое необходимо подключить к вольтметру, чтобы измерять напряжение до 1 кВ, если он рассчитан на 50 В и имеет внутреннее сопротивление 2 кОм.
125. Шкала микроамперметра с внутренним сопротивлением 10 Ом содержит 100 делений при цене деления 10 мкА. Найти сопротивление шунта, который необходимо подсоединить к прибору, чтобы можно было измерять ток до 1 А.
126. При замыкании источника тока проводником с сопротивлением 1.8 Ом сила тока в цепи 0.7 А. Если источник замкнуть проводником с сопротивлением 2.3 Ом, то сила тока станет 0.56 А. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.
127. Определить заряд, прошедший по проводу с сопротивлением 3 Ом при равномерном нарастании напряжения на концах провода от 2 В до 4 В в течение 20 с.

128. При внешнем сопротивлении 3 Ом ток в цепи 0.3 А, а при внешнем сопротивлении 5 Ом ток равен 0.2 А. Определить ток короткого замыкания .
129. Элемент с ЭДС 2 В имеет внутренне сопротивление 0.5 Ом. Найти падение напряжения внутри элемента при токе в цепи 0.25 А. Каково сопротивление нагрузки при этих условиях?
130. Определить силу тока в реостате (рис.12), если $E_1=5$ В, $E_2=4$ В, $E_3=3$ В, $r_1=2$ Ом, $r_2=1$ Ом, $r_3=0.5$ Ом, $R=2.5$ Ом.

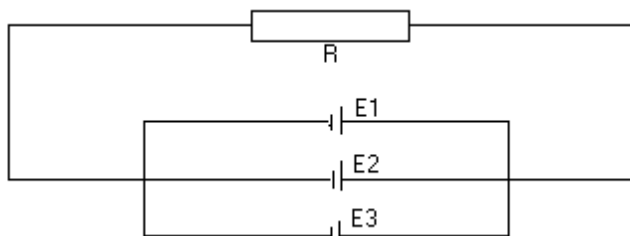


Рис.12

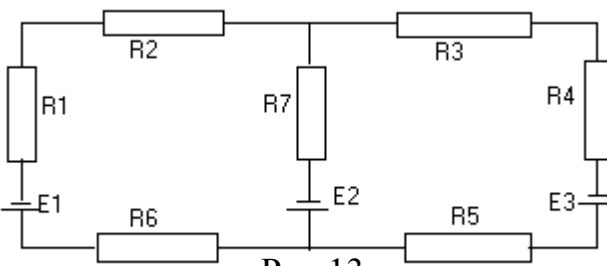


Рис.13

131. Найти силы токов в каждой ветви схемы (рис.13), внутренним сопротивлением источников пренебречь. $E_1=10$ В, $E_2=20$ В, $E_3=30$ В, $R_1=1$ Ом, $R_2=2$ Ом, $R_3=3$ Ом, $R_4=4$ Ом, $R_5=5$ Ом, $R_6=6$ Ом, $R_7=7$ Ом.
132. Зашунтированный амперметр измеряет токи до 10 А. Какую наибольшую силу тока может измерить этот амперметр без шунта, если сопротивление амперметра 0.02 Ом, сопротивление шунта 5 мОм?
133. Сила тока в проводнике изменяется по закону $I=4+2t$, где сила тока выражена в амперах, время – в секундах. Какой заряд проходит через поперечное сечение проводника за время от $t=2$ с до $t=6$ с? При какой силе постоянного

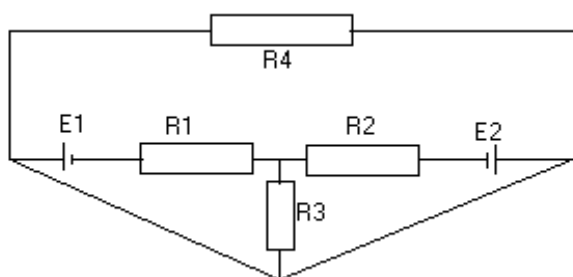


Рис.14

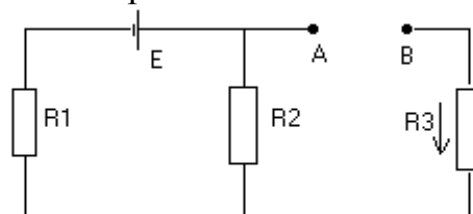


Рис.15

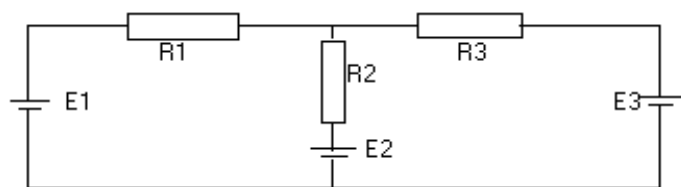


Рис.16

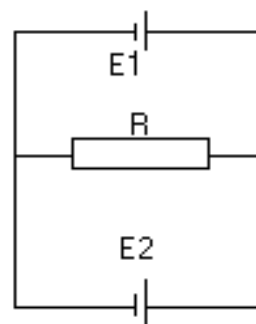


Рис.17

тока через поперечное сечение проводника за это же время проходит такой же заряд?

134. В электрическую цепь включены четыре сопротивления по 1 кОм каждое и источники тока, ЭДС которых 1.5 и 1.8 В (рис.14). Определить силы токов во всех сопротивлениях. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

135. Три сопротивления $R_1=5\text{ Ом}$, $R_2=1\text{ Ом}$, $R_3=3\text{ Ом}$ и источник тока с $E=1.4\text{ В}$ соединены так, как показано на рис.15. Определить ЭДС источника, который надо подключить в цепь между точками А и В так, чтобы в сопротивлении R_3 шел ток силой 1 А в направлении, указанном стрелкой. Сопротивлением источников пренебречь.
136. В схеме (рис.16) $E_1=2\text{ В}$, $E_2=4\text{ В}$, $E_3=6\text{ В}$, $R_1=4\text{ Ом}$, $R_2=6\text{ Ом}$, $R_3=8\text{ Ом}$. Найти силу тока во всех участках цепи. Сопротивлением источников пренебречь.
137. Даны два элемента с равными ЭДС по 2 В (рис.17). Внутренние сопротивления этих элементов равны $r_1=1\text{ Ом}$ и $r_2=2\text{ Ом}$. Чему равно внешнее сопротивление R , если сила тока, текущего через первый элемент, равна 1 А ? Найти силы токов, идущие через второй элемент и через сопротивление R .
138. Найти показание амперметра (рис.18), если ЭДС первого элемента равна 2 В , второго – 4 В . Первое сопротивление равно 0.5 Ом и падение напряжения на

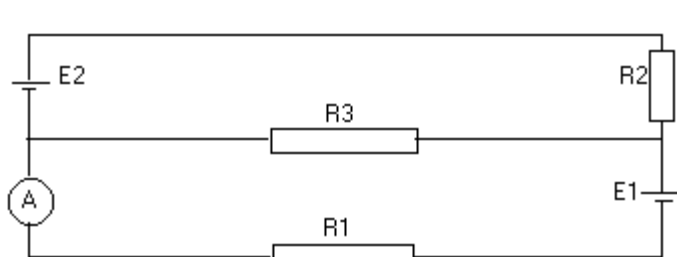


Рис.18

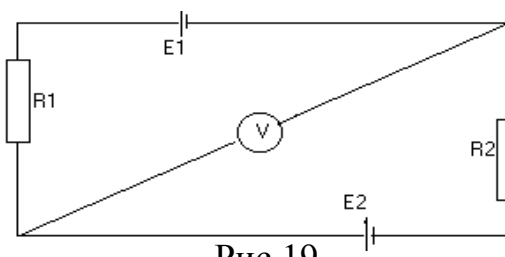


Рис.19

- нем 1 В . Внутренним сопротивлением элементов и амперметра пренебречь.
139. Найти ЭДС батарей ($E_1=E_2$), если сопротивления $R_1=R_2=100\text{ Ом}$ (рис.19). Вольтметр показывает напряжение 150 В . Сопротивление вольтметра равно 150 Ом . Внутренним сопротивлением батарей пренебречь.
140. Какую силу тока показывает амперметр в схеме (рис.20)? Сопротивлением амперметра и источника тока пренебречь.

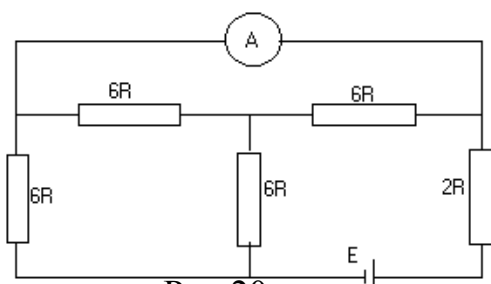


Рис.20

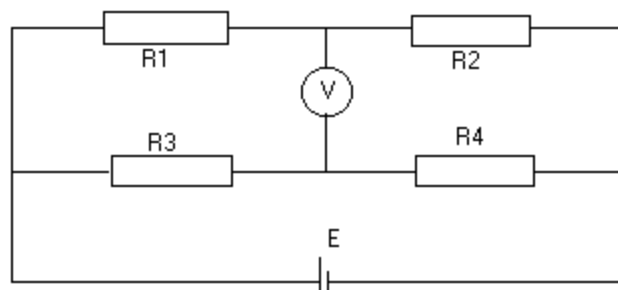


Рис.21

141. Определить показания вольтметра с внутренним сопротивлением 150 Ом , если первое сопротивление 2 Ом , второе – 9 Ом , третье – 3 Ом и четвертое – 7 Ом . ЭДС источника равна 1 В (рис.21). Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

142. Найти показания миллиамперметра, если ЭДС источников равны 1.5 В, внутренние сопротивления равны 0.5 Ом. $R_1=R_2=2$ Ом, $R_3=1$ Ом (рис.22). Сопротивление миллиамперметра равно 3 Ом.

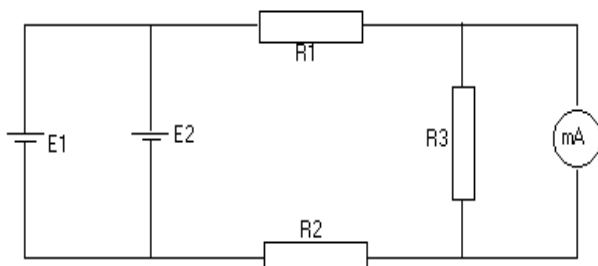


Рис.22

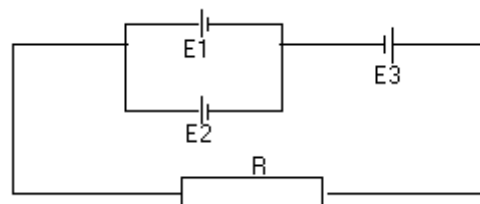


Рис.23

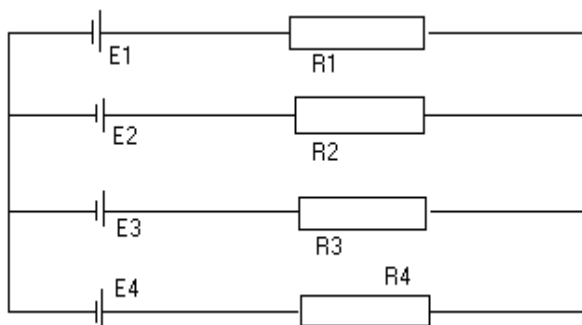


Рис.24

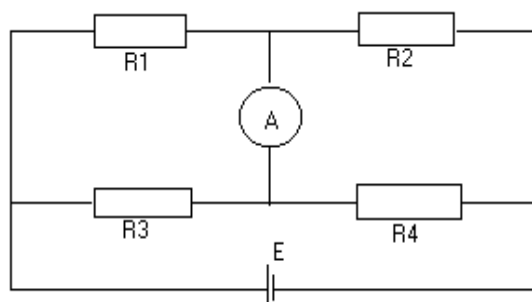


Рис.25

143. Три гальванических элемента с $E_1=2.5$ В, $E_2=2.2$ В и $E_3=3$ В и с внутренними сопротивлениями по 0.2 Ом каждый соединены так, как показано на рис.23. Внешнее сопротивление равно 4.7 Ом. Найти силы токов во всех участках цепи.
144. Определить токи, текущие через сопротивления данной цепи (рис.24), если ЭДС источников тока равны: $E_1=1$ В, $E_2=2$ В, $E_3=3$ В, $E_4=4$ В; сопротивления $R_1=1$ Ом, $R_2=2$ Ом, $R_3=3$ Ом, $R_4=4$ Ом. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.
145. Найти силу тока в отдельных ветвях мостика Уитстона (рис.25) и четвертое сопротивление при условии, что сила тока, идущего через амперметр, равна нулю. ЭДС источника тока 2 В, первое сопротивление 30 Ом, второе 45 Ом, третье – 200 Ом. Сопротивлением источника тока пренебречь.
146. Даны два элемента с одинаковой ЭДС в 2 В и одинаковым внутренним сопротивлением 0.5 Ом (рис.26). Найти силы токов, текущих через сопротивления $R_1=0.5$ Ом, $R_2=1.5$ Ом и через первый элемент.

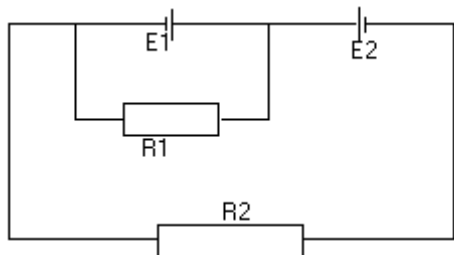


Рис.26

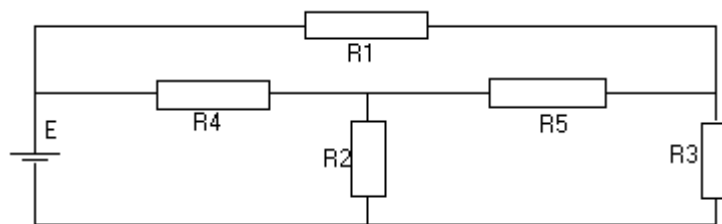


Рис.27

147. В цепи постоянного тока $E=10$ В, $R_1=5$ Ом, $R_2=R_3=1$ Ом, $R_4=R_5=3$ Ом (рис.27). Найти силы токов в каждой ветви.

148. Сопротивления цепи подобраны так, что ток через батарею с ЭДС $E_2=2$ В не идет (рис.28). Чему равны напряжение на сопротивлении R_2 и сила тока через сопротивление $R_3=2$ Ом, если $E_1=5$ В? Внутренними сопротивлениями батарей пренебречь.

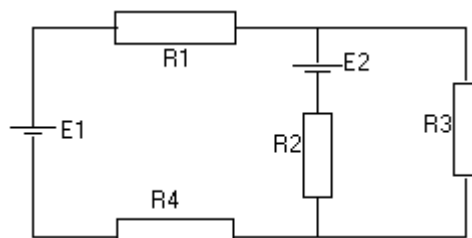


Рис.28

149. Определить сопротивление R_4 и токи в ветвях цепи (рис.29), если $R_1=2$ Ом, $R_2=4$ Ом, $R_3=5$ Ом, $E=3$ В и ток через батарею равен 1 А. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

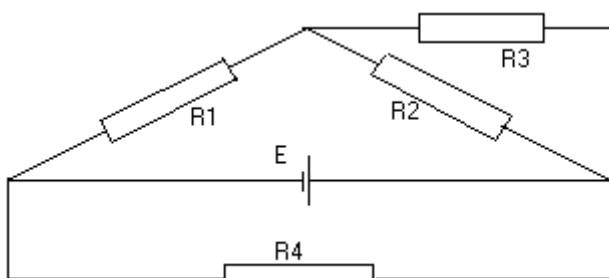


Рис.29

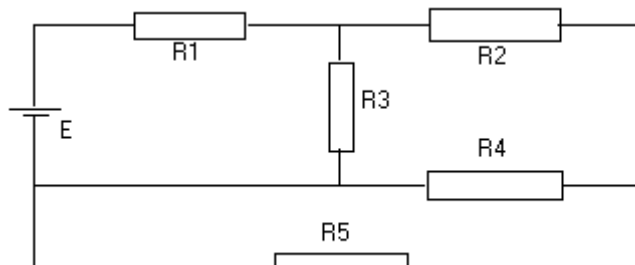


Рис.30

150. Определить ЭДС источника тока и токи в ветвях цепи (рис.30), если $R_1=R_2=5$ Ом, $R_3=3$ Ом, $R_4=1$ Ом, $R_5=2$ Ом и ток через четвертое сопротивление равен 1 А.
151. Определить сопротивления R_1 и R_2 и силу тока, текущего через сопротивление $R_3=1$ Ом, если $E_1=2$ В и $E_2=4$ В (рис.31). Амперметры показывают силы токов $I_1=0.73$ А и $I_2=0.165$ А. Внутренним сопротивлением источников и амперметров пренебречь.
152. Найти сопротивление вольтметра, если он показывает напряжение 100 В (рис.32). ЭДС источников одинаковы и равны 110 В, сопротивления одинаковы и равны 200 Ом.
153. Сила тока в проводнике сопротивлением 15 Ом равномерно возрастает от 0 до некоторого максимального значения в течение времени 5 с. За это время в проводнике выделилось количество теплоты 10 кДж. Найти среднюю силу тока в проводнике за этот промежуток времени.

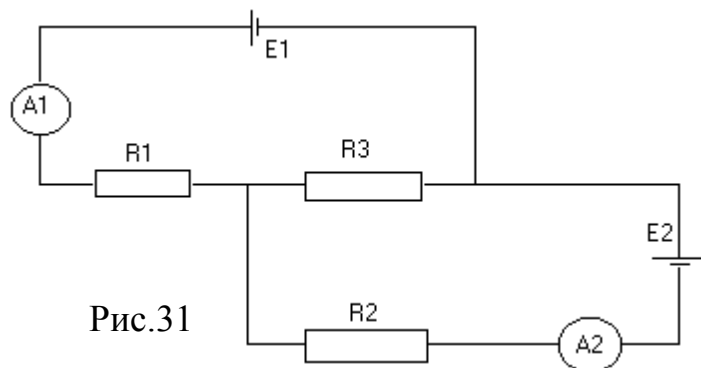


Рис.31

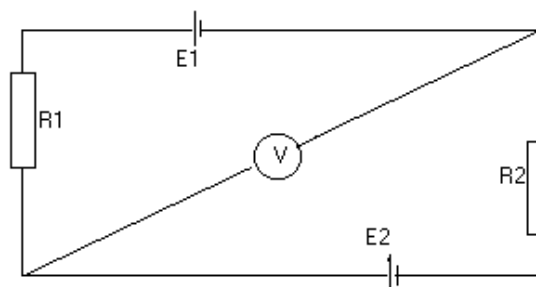


Рис.32

154. Элемент с ЭДС 1.6 В имеет внутреннее сопротивление 0.5 Ом. Найти КПД элемента при токе в цепи 2.4 А.
155. Сила тока в проводнике равномерно увеличивается от 0 до некоторого максимального значения в течение 10 с. За это время в проводнике

- выделилось количество теплоты 1 кДж. Определить скорость нарастания тока в проводнике, если сопротивление его равно 3 Ом.
156. В медном проводнике длиной 2 м и площадью поперечного сечения 0.4 мм^2 идёт ток. При этом каждую секунду выделяется количество теплоты 0.35 Дж. Сколько электронов проходит за 1 с через поперечное сечение проводника? Удельное сопротивление меди $1.7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
157. При силе тока 3 А во внешней цепи батареи аккумуляторов выделяется мощность 18 Вт, при силе тока 1 А – 10 Вт. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление батареи.
158. Сила тока в проводнике сопротивлением 100 Ом равномерно нарастает от 0 до 10 А за 30 с. Определить количество теплоты, выделившейся за это время в проводнике.
159. По проводнику сопротивлением 3 Ом течёт ток, сила которого равномерно возрастает. За 8 с в проводнике выделилось 200 Дж теплоты. Определить заряд, протекающий за это время по проводнику. В момент времени, принятый за начальный, сила тока в проводнике равна 0.
160. ЭДС батареи 80 В, внутреннее сопротивление 5 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность 100 Вт. Определить силу тока в цепи, напряжение, под которым находится внешняя цепь, и её сопротивление.
161. К батарее аккумуляторов с ЭДС 2 В и внутренним сопротивлением 0.5 Ом присоединён проводник. Определить: а) сопротивление проводника, при котором мощность, выделяемая в нём, максимальна; б) мощность, которая выделяется при этом.
162. К клеммам батареи присоединён нагреватель. ЭДС батареи 24 В, внутреннее сопротивление 1 Ом. Нагреватель, включённый в цепь, потребляет мощность 80 Вт. Вычислить силу тока в цепи и КПД нагревателя.
163. Обмотка электрокипятильника имеет две секции. Если включена только одна, то вода закипает через 15 минут, а если только вторая, то через 30 минут. Через сколько минут закипит вода при включении обеих секций: а) последовательно; б) параллельно?
164. Лампочка и реостат, соединённые последовательно, присоединены к источнику тока. Напряжение на клеммах лампочки равно 40 В. Сопротивление реостата 10 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность 120 Вт. Найти силу тока в цепи.
165. Найти внутреннее сопротивление генератора, если известно, что мощность, выделяемая во внешней цепи, одинакова при двух значениях внешнего сопротивления: при $R=5 \text{ Ом}$ и при $R=0.2 \text{ Ом}$. Найти КПД генератора в каждом случае.
166. ЭДС батареи 120 В, $R_1=25 \text{ Ом}$, $R_2=R_3=100 \text{ Ом}$ (рис.33). Найти мощность, выделяющуюся на сопротивлении R_1 .

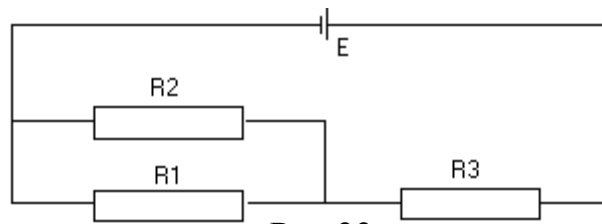


Рис.33

167. Батарея состоит из 5 последовательно соединенных элементов с ЭДС по 1.4 В каждый и внутренним сопротивлением по 0.3 Ом. При каком токе полезная мощность батареи равна 8 Вт?
168. КПД источника тока, замкнутого на внешнее сопротивление, равен 60%. Каков будет КПД, если увеличить внешнее сопротивление в 6 раз?
169. ЭДС батареи 20 В. Сопротивление внешней цепи 2 Ом, сила тока 4 А. С каким КПД работает батарея? При каком значении внешнего сопротивления КПД будет 99%?
170. К батарее, ЭДС которой 2 В и внутреннее сопротивление 0.5 Ом, присоединен проводник. Определить, при каком сопротивлении проводника мощность, выделяемая в нем, максимальна. Какая мощность выделяется при этом?
171. Трамвайный вагон потребляет ток 100 А при напряжении 600 В и развивает силу тяги 3 кН. Определить скорость движения трамвая на горизонтальном участке пути, если КПД электродвигателя 80%.
172. Определить плотность электрического тока в железном проводнике, если тепловая энергия, выделяемая в единице объема за секунду, равна 98 кДж/(м³·с). Удельное сопротивление железа $8.7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.
173. В железном проводнике длиной 2 м и площадью поперечного сечения 0.4 мм² за минуту выделяется теплота 48 Дж. Определить напряженность электрического поля в проводнике. Удельное сопротивление железа $8.7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.
174. Батарея с внутренним сопротивлением 3 Ом замкнута на катушку с сопротивлением 6 Ом. Определить сопротивление шунта, который нужно присоединить параллельно катушке, чтобы мощность, выделяемая в ней, уменьшилась в 9 раз.
175. На концах железного провода длиной 1.5 м и радиусом 0.3 мм поддерживается напряжение 10 В. Определить: 1) мощность, потребляемую в проводе; 2) количество теплоты, выделяемое в проводе за 1 час; 3) плотность тока. Удельное сопротивление железа $8.7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.
176. Сила тока в проводнике сопротивлением $R=10$ Ом изменяется по закону $I=2e^{-100t}$ (сила тока выражена в амперах, время – в секундах). Определить количество теплоты, выделившееся в проводнике за время 10 мс.
177. Найти количество теплоты, выделяющейся каждую секунду в 1 см³ медного провода при плотности тока 30 А/см². Удельное сопротивление меди $1.7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.
178. В медном проводнике объемом 6 см³ при прохождении по нему постоянного тока за 1 минуту выделилась теплота 200 Дж. Вычислить напряженность поля в проводнике. Удельное сопротивление меди $1.7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.
179. ЭДС батареи 12 В. Наибольшая сила тока 5 А. Какая наибольшая мощность может выделяться на подключенном к батарее резисторе с переменным сопротивлением?
180. Сила тока в проводнике сопротивлением 12 Ом равномерно убывает от 5 А до 0 за 10 с. Какое количество теплоты выделится в этом проводнике за указанный промежуток времени?

Раздел II. Электромагнетизм

5. Магнитное поле

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}; \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2} \quad - \text{закон Био-Савара-Лапласа}$$

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i; \quad \vec{B} = \int d\vec{B} \quad - \text{принцип суперпозиции}$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \quad - \text{связь индукции и напряженности магнитного поля}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad - \text{индукция магнитного поля прямого отрезка проводника}$$

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R} \quad - \text{индукция магнитного поля бесконечно длинного прямого тока}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \quad - \text{индукция в центре кругового тока}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}} \quad - \text{индукция на оси кругового тока}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 In}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2); \quad B = \mu\mu_0 In \quad - \text{индукция магнитного поля на оси соленоида конечной длины и бесконечно длинного соленоида.}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{v} \times \vec{r}]}{r^3}; \quad B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{r^2} \quad - \text{индукция магнитного поля, созданного движущимся зарядом}$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_i I_i^{\text{макро}}; \quad \oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \sum_i I_i^{\text{макро}} = \mu_0 \left(\sum_i I_i^{\text{макро}} + \sum_k I_k^{\text{микро}} \right) \quad - \text{закон}$$

полного тока для стационарных полей

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}; \quad \vec{p}_m = NIS\vec{n} \quad - \text{магнитный момент контура с током}$$

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]; \quad M = p_m B \sin \alpha \quad - \text{вращающий момент сил, действующий на контур с током в магнитном поле}$$

$$W_{\text{ном.}} = -\vec{p}_m \vec{B} = -p_m B \cos \alpha \quad - \text{потенциальная энергия магнитного диполя в магнитном поле}$$

$$F_x = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha \quad - \text{сила, действующая на магнитный диполь в неоднородном}$$

магнитном поле

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \times \vec{B}]; \quad dF_A = IdlB \sin \alpha \quad - \text{сила Ампера}$$

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]; \quad F_L = qvB \sin \alpha \quad - \text{сила Лоренца}$$

$$U_{34} = R_X \cdot \frac{IB}{a} = R_X \cdot j b B \quad - \text{Холловская разность}$$

потенциалов (рис.34)

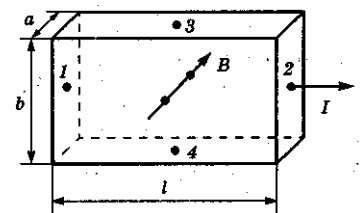


Рис.34

$$R_X = \frac{1}{ne} - \text{постоянная Холла}$$

$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = B dS \cos \alpha; \quad \Phi = \int_S \vec{B}d\vec{S} - \text{определение магнитного потока}$$

$$\Delta A = I \Delta \Phi - \text{работа поля по перемещению контура с током в магнитном поле}$$

Примеры решения задач

Задача 10

Чему должно быть равно отношение длины катушки к ее диаметру, чтобы напряженность магнитного поля в центре катушки можно было найти по формуле для напряженности поля бесконечно длинного соленоида? Ошибка при таком допущении не должна превышать 5%.

Решение

Воспользуемся формулами для напряжённости магнитного поля на оси соленоида конечной длины

Дано:
 $\varepsilon = 0.05$

Найти:
 $\frac{l}{D} = ?$

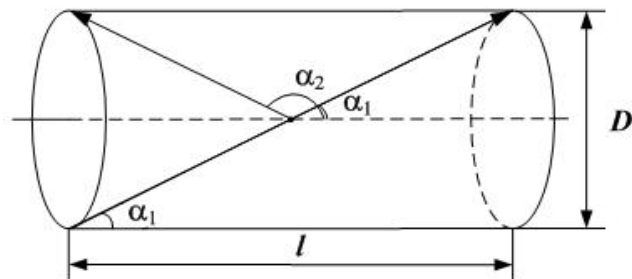


Рис.35

$H = \frac{In}{2}(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$ и бесконечно длинного соленоида $H_\infty = In$. Здесь $n = \frac{N}{l}$ – плотность намотки соленоида. Для напряжённости поля в центре соленоида в силу симметрии $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$ (см. рис. 35), тогда $\cos \alpha_2 = -\cos \alpha_1$, и

$$H = \frac{In}{2}(2 \cos \alpha_1) = In \cos \alpha_1.$$

Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} = \frac{H_\infty - H}{H} = \frac{H_\infty}{H} - 1$; или

$$\varepsilon = \frac{In}{In \cos \alpha_1} - 1 = \frac{1}{\cos \alpha_1} - 1; \quad \cos \alpha_1 = \frac{1}{1 + \varepsilon}. \quad \text{Из рис.35 } \cos \alpha_1 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + D^2}}. \quad \text{Тогда}$$

$$\frac{l}{\sqrt{l^2 + D^2}} = \frac{1}{1 + \varepsilon}, \quad \text{откуда } \frac{\sqrt{l^2 + D^2}}{l} = 1 + \varepsilon, \quad \sqrt{\frac{l^2 + D^2}{l^2}} = 1 + \varepsilon; \quad \sqrt{1 + \frac{D^2}{l^2}} = 1 + \varepsilon;$$

$$\frac{D}{l} = \sqrt{(1 + \varepsilon)^2 - 1}; \quad \frac{l}{D} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(2 + \varepsilon)}}. \quad \text{Подставим численные значения:}$$

$$\frac{l}{D} = \frac{1}{\sqrt{0.05(2 + 0.05)}} = 3.12.$$

$$\text{Ответ: } \frac{l}{D} = 3.12.$$

Задача 11

По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам текут токи силой 50 А и 100 А в противоположных направлениях. Расстояние между проводами 0.2 м. Определить магнитную индукцию в точке, удаленной на 0.25 м от первого и на 0.4 м от второго провода.

Дано:

$$I_1 = 50 \text{ А}$$

$$I_2 = 100 \text{ А}$$

$$r_1 = 0.4 \text{ м}$$

$$r_2 = 0.25 \text{ м}$$

$$d = 0.2 \text{ м}$$

Найти:

$$B = ?$$

Решение

По правилу правого винта определяем направления векторов индукции $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ магнитных полей, созданных в точке О токами I_1 и I_2 соответственно (рис.36). По принципу суперпозиции

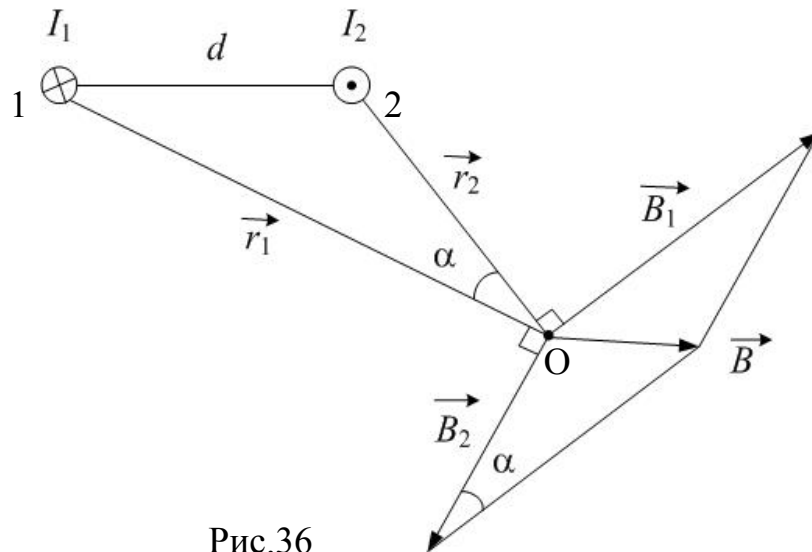


Рис.36

$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$. Величину результирующего вектора $\vec{B}$ найдём по теореме косинусов: $B^2 = B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cos \alpha$. Аналогично, по теореме косинусов для треугольника 12О: $d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha$.

$$\text{Тогда } B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - B_1B_2 \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{r_1r_2}}. \text{ Величины } \vec{B}_1 \text{ и } \vec{B}_2 \text{ определяем по}$$

формуле индукции прямого бесконечного проводника с током: $B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r_1}$ и

$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi r_2}$. Магнитную проницаемость считаем равной 1 (магнетика нет):

$$\mu = 1. \text{ Тогда } B = \frac{\mu_0}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{I_1}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{r_2}\right)^2 - \frac{I_1I_2}{r_1r_2} \cdot \frac{(r_1^2 + r_2^2 - d^2)}{r_1r_2}}. \text{ Подставим численные}$$

значения:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{50}{0.4}\right)^2 + \left(\frac{100}{0.25}\right)^2 - \frac{50 \cdot 100}{(0.4 \cdot 0.25)^2} (0.4^2 + 0.25^2 - 0.2^2)} = 58.1 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$$

Ответ: $B = 58.1 \text{ мкТл}$.

Задача 12

По сечению проводника равномерно распределен ток плотностью $2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Найти циркуляцию вектора напряженности вдоль окружности радиусом $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, проходящей внутри проводника и ориентированной так, что ее плоскость составляет угол 30° с вектором плотности тока.

Дано:

$$j = 2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

$$R = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\beta = 30^\circ$$

Найти:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = ?$$

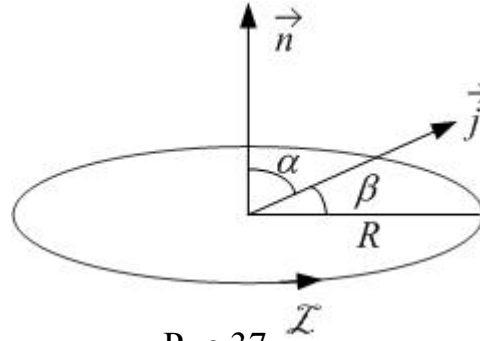


Рис.37

Решение

По теореме о циркуляции вектора напряжённости магнитного поля по произвольному замкнутому контуру равна результирующему макроток, текущему сквозь поверхность, натянутую на этот контур: $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_i I_i^{\text{макро}}$.

Суммарный макроток выразим через плотность тока:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S j \cdot \cos \alpha \cdot dS, \text{ где интеграл берётся по поверхности } S, \text{ натянутой}$$

на контур L , α – угол между нормалью к контуру и вектором плотности тока (рис.37). Поскольку $\alpha + \beta = 90^\circ$ и ток распределён равномерно ($j = \text{const}$), то

$$\int_S j \cdot \cos \alpha \cdot dS = j \cdot \sin \beta \cdot \int_S dS = j \cdot \sin \beta \cdot \pi R^2. \text{ Здесь учтено, что интеграл по}$$

поверхности, натянутой на контур, равен площади круга: $\int_S dS = \pi R^2$. Таким

образом, $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = j \cdot \sin \beta \cdot \pi \cdot R^2$. Подставим численные значения:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = 2 \cdot 10^6 \cdot \sin 30^\circ \cdot 3.14 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 = 78.5 \text{ А}.$$

$$\text{Ответ: } \oint_L \vec{H} d\vec{l} = 78.5 \text{ А}.$$

Задача 13

По тонкому стержню длиной 20 см равномерно распределен заряд 0.24 мкКл. Стержень приведен во вращение с постоянной угловой скоростью 10 рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Определить магнитный момент, обусловленный вращением заряженного стержня; отношение магнитного момента к моменту импульса, если стержень имеет массу 12 г.

Решение

Дано:
 $l=0.2$ м
 $q=0.24 \cdot 10^{-6}$ Кл
 $\omega=10$ рад/с
 $m=0.012$ кг

Найти:
 $p_m=?$
 $\frac{p_m}{L}=?$

На расстоянии x от оси вращения выделим элемент длины стержня dx (рис.38). Его заряд dq найдём из

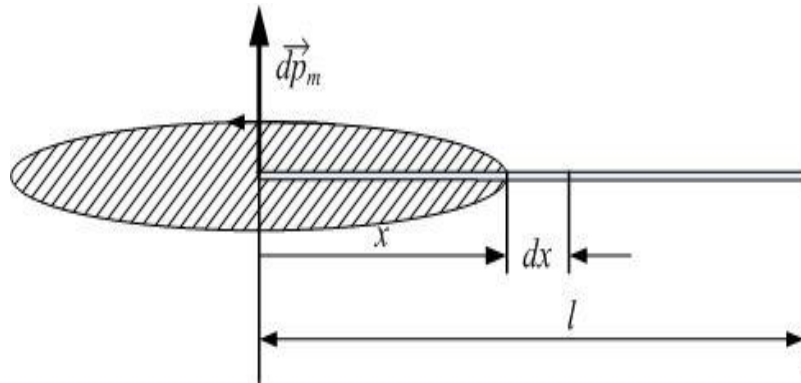


Рис.38

пропорции: $\frac{dq}{q} = \frac{dx}{l}$. Заряд dq , вращающийся по окружности, создаёт

эквивалентный ток $dI = \frac{dq}{T}$, где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – период вращения. Магнитный момент

этого тока равен $dp_m = dI \cdot S$, где $S = \pi \cdot x^2$ – площадь «витка» эквивалентного тока, поскольку заряд вращается по окружности радиусом x . Таким образом,

получим:
$$dp_m = dI \cdot S = dI \cdot \pi x^2 = \frac{dq}{T} \cdot \pi x^2 = \frac{q \cdot dx}{l \cdot \frac{2\pi}{\omega}} \cdot \pi x^2 = \frac{q \cdot \omega}{2 \cdot l} \cdot x^2 \cdot dx.$$

Проинтегрировав полученное выражение по всей длине стержня, получим магнитный момент, обусловленный его вращением:

$$p_m = \int_0^l dp_m = \int_0^l \frac{q \cdot \omega}{2 \cdot l} \cdot x^2 \cdot dx = \frac{q\omega}{2l} \int_0^l x^2 dx = \frac{q\omega}{2l} \cdot \frac{x^3}{3} \Big|_0^l = \frac{q\omega}{2l} \cdot \frac{l^3}{3} = \frac{q\omega \cdot l^2}{6}.$$

Момент импульса твёрдого тела по определению равен $L = J \cdot \omega$, где $J = \frac{ml^2}{3}$ – момент инерции стержня относительно оси, проходящей через конец

стержня перпендикулярно ему. Тогда $p_m = \frac{ml^2}{3} \cdot \omega$. Тогда отношение моментов

равно:
$$\frac{p_m}{L} = \frac{\frac{q\omega \cdot l^2}{6}}{\frac{ml^2 \cdot \omega}{3}} = \frac{q}{2m}.$$
 Подставим численные значения:

$$p_m = \frac{q\omega \cdot l^2}{6} = \frac{0.24 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 0.2^2}{6} = 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}^2;$$

$$\frac{p_m}{L} = \frac{q}{2m} = \frac{0.24 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0.012} = 10^{-5} \text{ Кл/кг}.$$

Ответ: $p_m = 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}^2$; $\frac{p_m}{L} = \frac{q}{2m} = 10^{-5} \text{ Кл/кг}$.

Задача 14

По квадратной рамке из тонкой проволоки массой 2 г был пропущен ток силой 6 А. Рамка свободно подвешена за середину одной из сторон на неупругой нити. Определить период малых колебаний такой рамки в однородном магнитном поле с индукцией 2 мТл. Затуханием колебаний пренебречь.

Решение

Дано:
 $m=0.002 \text{ кг}$
 $I=6 \text{ А}$
 $B=0.002 \text{ Тл}$

Найти:
 $T=?$

На рамку с током в магнитном поле действует момент сил $\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$. Величина момента зависит от угла α между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и магнитным моментом рамки p_m : $M = p_m B \sin \alpha$. В положении равновесия оба вектора направлены одинаково, $\alpha=0$ (рис.39). Если рамку вывести из положения равновесия, повернув на малый угол α , проекции момента сил и углового перемещения на ось вращения будут иметь противоположные знаки (момент сил возвращает в положение равновесия), тогда

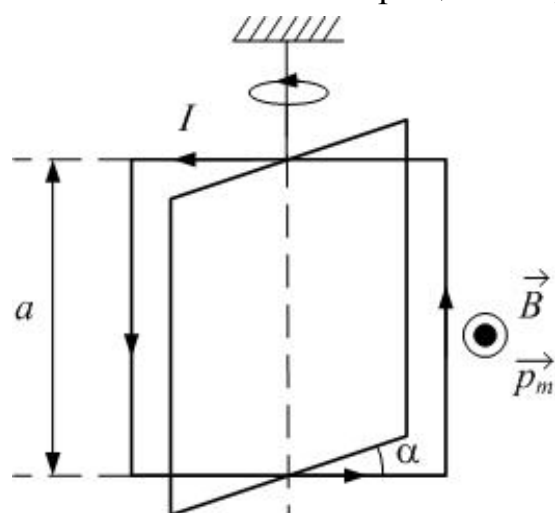


Рис.39

возвращает в положение равновесия), тогда $M = -p_m B \cdot \alpha$. Здесь учтено, что угол – малый, и $\sin \alpha \approx \alpha$. По закону динамики вращательного движения твёрдого тела $M = J \cdot \varepsilon$, где J – момент инерции тела относительно оси вращения; $\varepsilon = \alpha''$ – угловое ускорение, равное второй производной по времени от угла поворота. Таким образом, получим:

$$J \cdot \alpha'' = -p_m B \cdot \alpha, \text{ или } \alpha'' + \frac{p_m B}{J} \cdot \alpha = 0.$$

Сравнив с дифференциальным уравнением гармонических колебаний: $\alpha'' + \omega^2 \cdot \alpha = 0$, получим

$$\text{циклическую частоту: } \omega = \sqrt{\frac{p_m B}{J}}.$$

Обозначим a длину стороны рамки, тогда магнитный момент её равен $p_m = I \cdot S = I \cdot a^2$. Момент инерции J рамки можно найти как сумму моментов инерции всех четырёх сторон, масса каждой из которых равна $m_1 = \frac{m}{4}$. Для двух горизонтальных сторон используем формулу момента инерции тонкого стержня относительно оси, проходящей через его середину: $J_1 = \frac{m_1 \cdot a^2}{12} = \frac{ma^2}{48}$. Моменты инерции двух вертикальных сторон можно найти из формулы для момента инерции твёрдого тела $J = \int r^2 dm$ с учётом, что вся масса стороны $m_1 = \frac{m}{4}$

расположена на одинаковом расстоянии от оси, равном $r = \frac{a}{2}$:

$$J_2 = \int_{m_1} r^2 dm = r^2 \cdot \int_{m_1} dm = \left(\frac{a}{2}\right)^2 \cdot m_1 = \frac{a^2}{4} \cdot \frac{m}{4} = \frac{ma^2}{16}.$$

Тогда момент инерции всей

рамки $J = 2J_1 + 2J_2 = 2\left(\frac{ma^2}{48} + \frac{ma^2}{16}\right) = \frac{1}{6}ma^2$. Подставим выражения для p_m и J

в формулу для циклической частоты $\omega = \sqrt{\frac{p_m B}{J}} = \sqrt{\frac{Ia^2 B}{ma^2/6}} = \sqrt{\frac{6IB}{m}}$ и найдём

период колебаний: $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{6IB}} = \pi \sqrt{\frac{2m}{3IB}}$. Вычислим период, подставив

значения величин: $T = \pi \sqrt{\frac{2m}{3IB}} = 3.14 \sqrt{\frac{2 \cdot 0.002}{3 \cdot 6 \cdot 0.002}} = \frac{3.14}{3} = 1.05 \text{ с}.$

Ответ: $T = 1.05 \text{ с}.$

Задача 15

Протон влетел в однородное магнитное поле под углом 60° к направлению линий поля и движется по спирали, радиус которой 25 мм. Индукция магнитного поля 0.05 Тл. Найти кинетическую энергию протона.

Решение

Дано:
 $\alpha = 60^\circ$
 $R = 0.025 \text{ м}$
 $B = 0.05 \text{ Тл}$

Найти:
 $W_{\text{кин.}} = ?$

На протон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца, равная

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}],$$

направленная перпендикулярно скорости и индукции поля. Величина силы

равна $F_L = qvB \sin \alpha$. Скорость v протона можно разложить на две составляющие:

одна перпендикулярна направлению поля, другая параллельна: $v_\perp = v \sin \alpha$; $v_\parallel = v \cdot \cos \alpha$ (рис.40). Тогда можно

представить силу Лоренца как $F_L = qv_\perp B$. Движение частицы

является суперпозицией двух: вращение по окружности радиуса R со скоростью $v_\perp$ в плоскости,

перпендикулярной полю, и равномерное поступательное движение вдоль линий

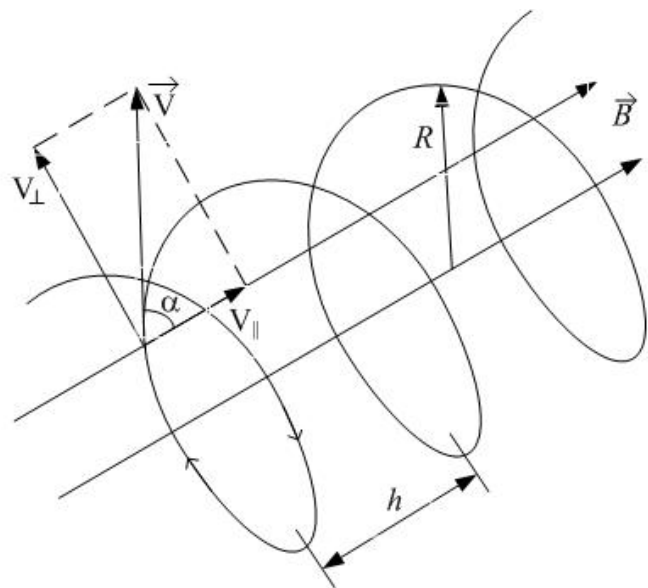


Рис.40

поля со скоростью $v_{\parallel}$; в результате получается движение по винтовой линии с шагом (расстоянием между соседними витками), равным $h = v_{\parallel} \cdot T$, где $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}$

– период вращения. По второму закону Ньютона $F_{\text{Л}} = m \cdot a_{\text{ц.с.}} = m \frac{v_{\perp}^2}{R}$, или

$q \cdot v_{\perp} \cdot B = m \frac{v_{\perp}^2}{R}$. Отсюда $R = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B}$; $T = \frac{2\pi m}{qB}$; $h = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi m}{qB}$. Для решения нашей

задачи достаточно из второго закона Ньютона выразить скорость и затем найти

кинетическую энергию: $v_{\perp} = \frac{RqB}{m}$; $v = \frac{v_{\perp}}{\sin \alpha} = \frac{RqB}{m \cdot \sin \alpha}$;

$W_{\text{кин.}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{RqB}{m \sin \alpha} \right)^2$; $W_{\text{кин.}} = \frac{1}{2m} \cdot \left(\frac{RqB}{\sin \alpha} \right)^2$. Подставим численные

значения:

$$W_{\text{кин.}} = \frac{1}{2 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}} \cdot \left(\frac{0.025 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.05}{\sin 60^0} \right)^2 = 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} = 100 \text{ эВ}.$$

Ответ: $W_{\text{кин.}} = 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} = 100 \text{ эВ}$.

Задача 16

Провод в виде тонкого полукольца радиусом 10 см находится в однородном магнитном поле с индукцией 50 мТл. По проводу течет ток силой 10 А. Найти силу, действующую на провод, если плоскость полукольца перпендикулярна линиям индукции, а подводящие провода находятся вне поля.

Решение

Дано:

$R=0.1 \text{ м}$

$B=0.05 \text{ Тл}$

$I=10 \text{ А}$

Найти:

$F=?$

Выделим

элемент тока

$I \cdot d\vec{l}$ (рис.41). Пусть

индукция магнитного поля направлена из-за рисунка к нам.

Угол между элементом тока и

вектором индукции равен 90^0 , тогда величина силы Ампера, действующей на этот элемент,

$dF = IdlB \sin 90^0 = IdlB$, а направление её, найденное по правилу левой руки, указано на рисунке. Проекции силы Ампера на оси OX и OY равны соответственно:

$dF_x = dF \cdot \cos \alpha$ и

$dF_y = dF \cdot \sin \alpha$. Элемент длины проводника можно выразить через приращение

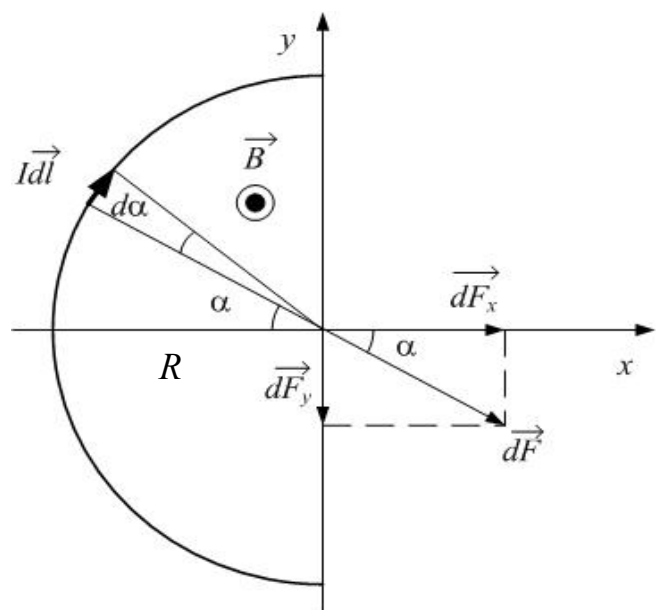


Рис.41

угла $d\alpha$: $dl = R \cdot d\alpha$. Тогда

$$dF_x = I \cdot B \cdot R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha,$$

$$dF_y = I \cdot B \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha.$$

Полученные выражения проинтегрируем по всей длине полуокружности, то есть по углу α в пределах $\left(-\frac{\pi}{2}\right) \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$:

$$F_x = \int dF_x = IBR \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha d\alpha = IBR(\sin \alpha) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = IBR \left(\sin \frac{\pi}{2} - \sin \left(-\frac{\pi}{2} \right) \right) = 2IBR$$

Аналогично,

$$F_y = \int dF_y = IBR \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha = IBR(-\cos \alpha) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = 0.$$

Таким образом, результирующая сила направлена по оси OX и равна $F = F_x = 2IBR$. Подставим численные значения:

$$F = 2 \cdot 10 \cdot 0.05 \cdot 0.1 = 0.1 \text{ Н}.$$

Ответ: $F = 0.1 \text{ Н}$.

Задача 17

В одной плоскости с длинным прямым проводом, по которому течет ток силой 50 А, расположена прямоугольная рамка так, что две большие стороны ее длиной 0.65 м параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из этих сторон равно ее ширине. Найти магнитный поток, пронизывающий рамку.

Решение

Дано:

$$I=50 \text{ А}$$

$$a=0.65 \text{ м}$$

$$b=l$$

Найти:

$$\Phi = ?$$

Прямой бесконечный проводник с током создаёт магнитное поле, величина вектора индукции которого определяется расстоянием x до провода: $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot x}$,

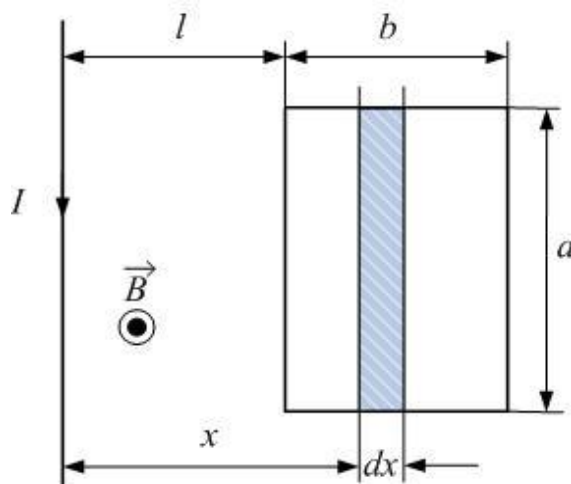


Рис.42

а направление – по правилу правого винта (рис.42). Найдём магнитный поток $d\Phi$ через малую площадку $dS = a \cdot dx$, параллельную проводнику. Так как dx мало, то в пределах заштрихованного прямоугольника индукцию можно считать одинаковой, и по определению магнитного потока

$d\Phi = B \cdot dS \cdot \cos \alpha$, где $\alpha = 0$ – угол между направлением вектора $\vec{B}$ и нормалью к

площадке. Таким образом, $d\Phi = B \cdot a \cdot dx = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi \cdot x} \cdot a \cdot dx$. Проинтегрируем полученное выражение по x в пределах $l \leq x \leq (l+b)$, то есть по всей площади прямоугольника:

$$\Phi = \int d\Phi = \int_l^{l+b} \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi \cdot x} \cdot a \cdot dx = \frac{\mu\mu_0 I a}{2\pi} \int_l^{l+b} \frac{dx}{x};$$

$$\Phi = \frac{\mu\mu_0 I a}{2\pi} \cdot (\ln x) \Big|_l^{l+b} = \frac{\mu\mu_0 I a}{2\pi} (\ln(l+b) - \ln l); \quad \Phi = \frac{\mu\mu_0 I a}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{(l+b)}{l} \right) = \frac{\mu_0 I a}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{l},$$

так как $\mu = 1$. И, наконец, $\Phi = \frac{\mu_0 I a}{2\pi} \cdot \ln 2$. Подставим численные значения:

$$\Phi = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 0.65}{2\pi} \cdot \ln 2 = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}.$$

Ответ: $\Phi = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} = 4.5 \text{ мкВб}$.

181. По проводнику, согнутому в виде квадратной рамки со стороной 10 см, течет ток силой 5 А. Определить индукцию магнитного поля в точке, равноудаленной от вершин квадрата на расстояние, равное его стороне.
182. При силе тока 0.5 А индукция магнитного поля на оси достаточно длинного соленоида 3.15 мТл. Определить диаметр провода, из которого изготовлена однослойная обмотка соленоида. Витки плотно прилегают друг к другу. Сердечника нет.
183. Из проволоки диаметром 0.1 мм и сопротивлением 0.25 Ом намотан соленоид на картонном цилиндре (витки вплотную). Определить индукцию магнитного поля на оси соленоида, если напряжение на концах обмотки 2 В.
184. Тонкий диск, радиус которого равен 25 см, сделан из диэлектрика и равномерно заряжен зарядом 5 Кл. Диск вращается в воздухе вокруг оси, проходящей через его центр и ему перпендикулярной, с постоянной частотой 5 Гц. Определить магнитную индукцию в центре диска.
185. Найти напряженность магнитного поля соленоида, диаметр которого равен 2 см и длина 30 см, в его центре и в середине основания соленоида. Сила тока равна 2 А. Плотность намотки 30 см^{-1} . Сравнить с напряженностью поля на оси бесконечно длинного соленоида.
186. Найти напряженность магнитного поля в середине соленоида, диаметр которого равен 2 см, для двух случаев: 1) длина соленоида 3 см; 2) длина соленоида 30 см. Сила тока равна 2 А. Плотность намотки 30 см^{-1} .
187. Отрезок прямолинейного проводника с током имеет длину 30 см. При каком предельном расстоянии от него для точек, лежащих на перпендикуляре к его середине, магнитное поле можно рассматривать как поле бесконечно длинного прямолинейного тока? Ошибка при таком допущении не должна превышать 5%.
188. Два бесконечно длинных провода находятся на расстоянии 0.05 м один от другого. По проводам текут в противоположных направлениях одинаковые

- токи силой 10 А каждый. Найти напряженность магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 0.02 м от одного и 0.03 м от другого провода.
189. Расстояние между двумя длинными параллельными проводами 0.05 м. По проводам в одном направлении текут одинаковые токи в 30 А каждый. Найти напряженность магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 0.04 м от одного и 0.03 м от другого провода.
190. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам текут токи силой 50 А и 100 А в противоположных направлениях. Расстояние между проводами 0.2 м. Определить магнитную индукцию в точке, удаленной на 0.25 м от первого и на 0.4 м от второго провода.
191. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам текут токи силой 20 и 30 А в одном направлении. Расстояние между ними 10 см. Вычислить магнитную индукцию в точке, удаленной от обоих проводов на одинаковое расстояние 10 см.
192. Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток 100 А. Вычислить магнитную индукцию в обеих точках, лежащих на биссектрисе угла и удаленных от вершины угла на 1 м.
193. По бесконечно длинному прямому проводу, согнутому под углом 120° , течет ток силой 50 А. Найти магнитную индукцию в обеих точках, лежащих на биссектрисе угла и удаленных от его вершины на 0.05 м.
194. По контуру в виде равностороннего треугольника течет ток 40 А. Длина стороны треугольника равна 0.3 м. Определить магнитную индукцию в точке пересечения высот.
195. По контуру в виде квадрата течет ток 50 А. Длина стороны квадрата 0.2 м. Определить магнитную индукцию в точке пересечения диагоналей.
196. Два бесконечно длинных прямых провода скрещены под прямым углом. По проводам текут токи 100 и 50 А. Расстояние между ними 20 см. Определить индукцию магнитного поля в точке, лежащей на середине общего перпендикуляра к проводам.
197. Ток 50 А течет по проводнику, согнутому под прямым углом. Найти напряженность магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии 0.2 м. Считать, что оба конца проводника находятся очень далеко от вершины угла.
198. Определить максимальную магнитную индукцию поля, создаваемого электроном, движущимся прямолинейно со скоростью 10 Мм/с в точке, отстоящей от траектории на расстояние 1 нм.
199. Ток идет по полой металлической трубе. Покажите, что напряженность магнитного поля внутри трубы равна нулю, а напряженность магнитного поля вне трубы такая же, как напряженность поля, созданного током, текущим по тонкому проводу, совпадающему с осью трубы.
200. Ток силой 20 А идет по полой тонкостенной трубе радиусом 5 см и обратно – по сплошному проводнику радиусом 1 мм, проложенному по оси трубы. Длина трубы 20 м. Чему равен магнитный поток такой системы? Магнитным полем внутри металла пренебречь.

201. Проволочный виток диаметром 20 см помещен в однородное магнитное поле, индукция которого равна 1 мТл. При пропускании по витку тока 2 А виток повернулся на угол 90° . Какой момент сил действовал на виток?
202. Плоский контур площадью 4 см^2 расположен параллельно однородному магнитному полю напряженностью 10 кА/м. По контуру кратковременно пропустили ток силой 2 А, и контур начал свободно вращаться. Определить угловое ускорение контура при пропускании тока. Момент инерции контура 10^{-6} кг м^2 .
203. Ток, текущий в рамке, содержащей 10 витков, создает в центре рамки магнитное поле с индукцией 0.126 Тл. Найти магнитный момент рамки, если ее радиус 10 см, и силу тока.
204. Очень короткая катушка содержит 1000 витков тонкого провода. Катушка имеет квадратное сечение со стороной 0.1 м. Найти магнитный момент катушки при силе тока 1 А.
205. Магнитный момент витка равен 0.2 Дж/Тл. Определить силу тока в витке, если его диаметр 0.1 м.
206. Напряженность магнитного поля в центре кругового витка равна 200 А/м. Магнитный момент витка равен 1 А/м². Вычислить силу тока в витке и радиус витка.
207. По кольцу радиусом R течет ток. На оси кольца на расстоянии $d=1$ м от его плоскости магнитная индукция равна $1 \cdot 10^{-8}$ Тл. Определить магнитный момент кольца с током. Считать R много меньшим d .
208. Электрон в невозбужденном атоме водорода движется вокруг ядра по окружности радиусом $53 \cdot 10^{-12}$ м. Вычислить магнитный момент эквивалентного кругового тока и механический момент, действующий на круговой ток, если атом помещен в магнитное поле, линии индукции которого параллельны плоскости орбиты электрона. Магнитная индукция поля равна 0.1 Тл.
209. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите. Найти отношение магнитного момента эквивалентного кругового тока к моменту импульса орбитального движения электрона. Указать направления векторов магнитного момента и момента импульса.
210. По тонкому стержню длиной 20 см равномерно распределен заряд 0.24 мкКл. Стержень приведен во вращение с постоянной угловой скоростью 10 рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Определить магнитный момент, обусловленный вращением заряженного стержня; отношение магнитного момента к моменту импульса, если стержень имеет массу 12 г.
211. Тонкое кольцо, несущее равномерно распределенный заряд 10 нКл, вращается с частотой 10 Гц относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр. Найти магнитный момент кругового тока, создаваемого кольцом; отношение магнитного момента к моменту импульса, если масса кольца 10 г. Внешний радиус кольца 10 см, внутренний – 5 см.

212. Тонкий диск радиусом 10 см несет равномерно распределенный по поверхности заряд 0.2 мкКл. Диск равномерно вращается с частотой 20 Гц относительно оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр. Найти: 1) индукцию магнитного поля в центре диска; 2) магнитный момент кругового тока, создаваемого диском; 3) отношение магнитного момента к моменту импульса, если масса диска 10 г.
213. Рамка гальванометра длиной 4 см и шириной 15 см, содержащая 200 витков тонкой проволоки, находится в магнитном поле с индукцией 0.1 Тл. Плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции. Найти механический момент, действующий на рамку, когда по ней течет ток 1 мА; магнитный момент рамки при этом токе.
214. Короткая катушка площадью $150 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ содержит 200 витков провода, по которому течет ток силой 4 А, помещена в однородное магнитное поле напряженностью $8 \cdot 10^3 \text{ А/м}$. Определить магнитный момент катушки, а также вращающий момент, действующий на катушку со стороны поля, если ось катушки составляет угол 60° с линиями индукции.
215. Короткая катушка площадью поперечного сечения $2.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, содержащая 500 витков провода, по которому течет ток силой 5 А, помещена в однородном магнитном поле напряженностью 1000 А/м. Найти: а) магнитный момент катушки; б) вращающий момент, действующий на катушку, если ось катушки составляет угол 30° с линиями поля.
216. Виток диаметром 0.1 м может вращаться около вертикальной оси, совпадающей с одним из диаметров витка. Виток установили в плоскости магнитного меридиана и пустили по нему ток 40 А. Какой вращающий момент нужно приложить к витку, чтобы удержать его в первоначальном положении? Горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли принять равной $2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.
217. Период небольших колебаний маленькой магнитной стрелки вокруг вертикальной оси в магнитном поле Земли равен 0.7 с. Период колебаний той же стрелки, помещенной внутри соленоида, по которому идет ток, равен 0.1 с. Затухание колебаний в обоих случаях невелико. Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли равна 14.3 А/м. Определите напряженность магнитного поля внутри соленоида.
218. По квадратной рамке из тонкой проволоки массой 2 г был пропущен ток силой 6 А. Рамка свободно подвешена за середину одной из сторон на неупругой нити. Определить период малых колебаний такой рамки в однородном магнитном поле с индукцией 2 мТл. Затуханием колебаний пренебречь.
219. Из тонкой проволоки массой 4 г изготовлена квадратная рамка, свободно подвешенная на неупругой нити, по которой пропущен ток силой 8 А. Определить частоту малых колебаний рамки в магнитном поле с индукцией 0.02 Тл.
220. По двум параллельным проводам длиной 1 м каждый текут токи одинаковой силы. Расстояние между проводами равно 0.01 м. Токи взаимодействуют с силой $1 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$. Найти силу тока в проводах.

221. По двум параллельным проводникам длиной 3 м каждый текут одинаковые токи силой 500 А. Расстояние между ними 0.1 м. Определить силу взаимодействия проводников.
222. Между полюсами магнита на двух тонких непроводящих нитях подвешен горизонтально линейный проводник весом 0.1 Н и длиной 20 см. Напряженность однородного магнитного вертикального поля равна 200 кА/м. На какой угол от вертикали отклонятся нити, поддерживающие проводник, если по нему пропустить ток 2 А? Весом нитей пренебречь.
223. По двум длинным параллельным проводникам, расстояние между которыми 7.5 см, текут в одном направлении токи 10 А и 5 А. Где следует поместить параллельный им третий проводник с током, чтобы он находился в равновесии?
224. По двум длинным параллельным проводникам в одном направлении текут токи силой по 2 кА. В одной плоскости с проводниками параллельно им закреплен отрезок прямого провода длиной 50 см. Определить силу тока в проводе, если после снятия закрепления он начинает двигаться с ускорением 1 м/с^2 . Масса провода 100 г, он расположен на расстоянии 20 см от одного и 40 см от другого проводника. Расстояние между проводниками 20 см.
225. С какой силой действует постоянный ток 10 А, проходящий по прямолинейному бесконечно длинному проводнику, на контур из провода, изогнутого в виде квадрата? Проводник расположен в плоскости контура параллельно двум его сторонам. Длина стороны контура 40 см, сила тока в нем 2.5 А. Расстояние от прямолинейного тока до ближайшей стороны контура 2 см.
226. Медный провод, площадь сечения которого 2 мм^2 , согнут в виде трех сторон квадрата и подвешен за концы к горизонтальной оси в вертикальном магнитном поле. Когда по проводу пропускают ток силой 10 А, он отклоняется от вертикали на угол 15° . Определить магнитную индукцию.
227. Прямой провод длиной 40 см, по которому течет ток 100 А, движется в однородном магнитном поле, индукция которого перпендикулярна проводу и равна 0.5 Тл. Какую работу совершают силы, действующие на провод со стороны поля, при перемещении провода на расстояние 40 см, если направление перемещения перпендикулярно линиям индукции и проводу?
228. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две стороны ее параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи силой $1 \cdot 10^3 \text{ А}$. Определить силу, действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии, равном ее длине.
229. По тонкому проводу в виде кольца радиусом 20 см течет ток силой 100 А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено однородное магнитное поле с индукцией 20 мТл. Найти силу, растягивающую кольцо.
230. По двум тонким проводам, изогнутым в виде кольца радиусом 0.1 м, текут одинаковые токи по 10 А. Найти силу взаимодействия колец, если плоскости, в которых лежат кольца, параллельны, а расстояние между центрами колец равно 0.001 м.

231. По двум одинаковым квадратным плоским контурам со стороной 20 см текут токи силой 10 А каждый. Определить силу взаимодействия контуров, если плоскости, в которых лежат контуры, параллельны, а расстояние между соответственными сторонами контуров равно 2 мм.
232. Вычислить радиус дуги окружности, которую описывает протон в магнитном поле с индукцией $1.5 \cdot 10^{-2}$ Тл, если скорость протона равна $2 \cdot 10^6$ м/с.
233. Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией 0.015 Тл по окружности радиусом 0.1 м. Определить импульс иона.
234. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией 0.5 Тл. Определить момент импульса, которым обладала частица при движении в магнитном поле, если ее траектория представляла дугу окружности радиусом 0.001 м.
235. Заряженная частица влетела перпендикулярно линиям индукции в однородное магнитное поле, созданное в среде. В результате взаимодействия с веществом частица, находясь в поле, потеряла половину своей первоначальной энергии. Во сколько раз будут отличаться радиусы кривизны траектории начала и конца пути?
236. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов 600 В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией 0.3 Тл и начал двигаться по окружности. Вычислить ее радиус.
237. Электрон движется в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции. Определить силу, действующую на него со стороны поля, если индукция равна 0.2 Тл, а радиус кривизны траектории 2 мм.
238. Протон и α -частица, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона меньше радиуса кривизны траектории α -частицы?
239. Заряженная частица, имеющая скорость $2 \cdot 10^6$ м/с, влетела в однородное магнитное поле с индукцией 0.52 Тл. Найти отношение заряда частицы к ее массе, если она в поле описала дугу окружности радиусом 0.04 м. По этому отношению определить, какая это частица.
240. Заряженная частица, прошедшая ускоряющую разность потенциалов $2 \cdot 10^3$ В, движется в однородном магнитном поле с индукцией 0.015 Тл по окружности радиусом 0.01 м. Определить отношение заряда частицы к ее массе и скорость частицы.
241. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле напряженностью $1 \cdot 10^4$ А/м. Вычислить период вращения электрона.
242. Электрон в однородном магнитном поле с индукцией 0.1 Тл движется по окружности. Найти силу эквивалентного кругового тока, создаваемого движением электрона.
243. Электрон, влетев в однородное магнитное поле с индукцией 0.2 Тл, стал двигаться по окружности радиусом 0.05 м. Определить магнитный момент эквивалентного кругового тока.

244. Протон движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл. Определить силу эквивалентного кругового тока, создаваемого движением протона.
245. В однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл движется α -частица. Траектория ее движения представляет собой винтовую линию с радиусом 0.01 м и шагом 0.06 м. Определить кинетическую энергию α -частицы.
246. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов 52 В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое с напряженностью 10^4 В/м и магнитное с индукцией 0.1 Тл поля. Найти отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории. Определить, какая это частица.
247. В однородном магнитном поле с индукцией 10^{-4} Тл движется электрон по винтовой линии. Определить скорость электрона, если шаг винтовой линии равен 0.20 м, а радиус 0.05 м.
248. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией 0.009 Тл по винтовой линии, радиус которой 0.01 м и шаг 0.078 м. Определить период вращения электрона и его скорость.
249. Заряженная частица движется по окружности радиусом 0.01 м в однородном магнитном поле с индукцией 0.1 Тл. Параллельно магнитному полю возбуждено электрическое поле напряженностью 100 В/м. Вычислить промежуток времени, в течение которого должно действовать электрическое поле для того, чтобы кинетическая энергия частицы возросла вдвое.
250. Электрон влетает в однородное магнитное поле напряженностью $16 \cdot 10^3$ А/м со скоростью $8 \cdot 10^6$ м/с. Вектор скорости составляет угол 60° с направлением линии индукции. Определить радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться электрон в магнитном поле. Определить шаг винтовой линии для электрона, летящего под малым углом к линиям индукции.
251. Вычислить скорость и кинетическую энергию α -частицы, выходящей из циклотрона, если, подходя к выходному окну, ионы движутся по окружности радиусом 0.50 м. Индукция магнитного поля циклотрона 1.7 Тл.
252. Параллельно длинному прямолинейному проводнику с током 10 А на расстоянии 2 мм от проводника движется электрон со скоростью 10 Мм/с. С какой силой будет действовать магнитное поле тока на электрон?
253. Найти кинетическую энергию электрона, движущегося по дуге окружности радиусом 8 см в однородном магнитном поле, индукция которого равна 0.2 Тл. Направление индукции магнитного поля перпендикулярно плоскости окружности.
254. Положительный заряд влетает с постоянной скоростью в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Индукция поля 1 Тл. В течение 100 мкс параллельно индукции магнитного поля действует электрическое поле напряженностью 100 В/м. Вычислить постоянный (при установившемся движении) шаг спиральной траектории заряда.
255. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов 400 В, влетел в однородное магнитное поле с напряженностью 1000 А/м перпендикулярно

силовым линиям поля. Определить радиус кривизны траектории и частоту обращения электрона в магнитном поле.

256. Электрон, прошедший в ускоряющем электрическом поле разность потенциалов 10 кВ, движется в однородном магнитном поле с индукцией 0.5 Вб/м², перпендикулярной его скорости. Определить момент импульса электрона.
257. Электрон, влетевший в однородное магнитное поле с напряженностью 32 кА/м перпендикулярно направлению силовых линий поля, движется в нем по окружности радиусом 2 см. Найти разность потенциалов, которую прошел электрон перед тем, как влететь в магнитное поле.
258. Циклотрон предназначен для ускорения протонов до энергии $8 \cdot 10^{-15}$ Дж. Каков должен быть радиус дуантов циклотрона, если индукция магнитного поля равна 1 Тл? Какова наименьшая продолжительность одного цикла работы этого ускорителя, если начальная энергия протонов мала, а амплитуда напряжения между дуантами 16 кВ?
259. Определить число оборотов, которые должен сделать протон в магнитном поле циклотрона, чтобы приобрести кинетическую энергию $10 \cdot 10^6$ эВ, если при каждом обороте протон проходит между дуантами разность потенциалов $30 \cdot 10^3$ В.
260. Кинетическая энергия α -частицы равна $5 \cdot 10^8$ эВ. Частица движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом 0.8 м. Определить магнитную индукцию поля, учитывая нелинейную зависимость импульса частицы от ее скорости.
261. Электрон, имеющий кинетическую энергию $1.5 \cdot 10^6$ эВ, движется в однородном магнитном поле по окружности. Магнитная индукция поля равна 0.02 Тл. Определить период вращения, учитывая нелинейную зависимость импульса частицы от ее скорости.
262. Катушка длиной 40 см и диаметром 4 см содержит 2000 витков проволоки сопротивлением 15 Ом. Определить напряженность и индукцию магнитного поля внутри катушки, а также поток магнитной индукции через ее сечение, если к катушке подведено напряжение 6 В.
263. Магнитный поток сквозь сечение соленоида равен $5 \cdot 10^{-5}$ Вб. Длина соленоида 0.50 м. Найти магнитный момент соленоида, если его витки плотно прилегают друг к другу.
264. Соленоид длиной 1 м и сечением $1.6 \cdot 10^{-3}$ см² содержит 2000 витков. Вычислить потокоцепление при силе тока в обмотке 10 А.
265. Прямой провод длиной 0.4 м, по которому течет ток силой 100 А, движется в однородном магнитном поле с индукцией 0.5 Тл. Какую работу совершат силы, действующие на провод со стороны поля, при перемещении его на расстояние 0.4 м, если направление перемещения перпендикулярно линиям индукции и проводу? Угол между линиями индукции поля и проводом 30° .
266. В однородном магнитном поле с индукцией 0.01 Тл находится прямой провод длиной 0.08 м, расположенный перпендикулярно линиям индукции. По проводу течет ток силой 2 А. Провод переместился в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, на расстояние 0.05 м. Угол между

- перемещением и проводом 60° . Найти работу сил поля. Найти работу сил поля, если провод перемещался в плоскости, параллельной линиям индукции.
267. Плоский контур с площадью $3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ находится в однородном магнитном поле с индукцией 0.01 Тл . Плоскость контура перпендикулярна линиям индукции. В контуре поддерживается неизменный ток силой 10 А . Определить работу внешних сил по перемещению контура с током в область пространства, магнитное поле в которой отсутствует.
268. По проводу, согнутому в виде квадрата со стороной 0.1 м , течет постоянный ток силой 20 А . Плоскость квадрата составляет угол 30° с линиями индукции однородного магнитного поля с индукцией 0.1 Тл . Вычислить работу, которую необходимо совершить для удаления провода за пределы поля.
269. Виток, по которому течет ток силой 20 А , свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией 0.016 Тл . Диаметр витка равен 0.10 м . Определить работу, которую нужно совершить, чтобы виток повернулся на угол 90° относительно оси, совпадающей с диаметром. То же при угле 360° .
270. Плоский контур с током 5 А свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией 0.4 Тл . Площадь контура $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. Поддерживая ток в контуре неизменным, его повернули относительно оси, лежащей в плоскости контура, на угол 60° . Определить совершенную при этом работу.

6. Магнитное поле в веществе. Энергия магнитного поля

$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B}{\mu_0 H} \text{ — магнитная проницаемость вещества}$$

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} \text{ — намагниченность вещества}$$

$$\vec{p}_m = \vec{J}V \text{ — магнитный момент прямого магнита}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \text{ — напряженность поля в магнетике}$$

$$\left. \begin{aligned} B_{1n} &= B_{2n}, & H_{1\tau} &= H_{2\tau} \\ \frac{H_{1n}}{H_{2n}} &= \frac{\mu_2}{\mu_1}, & \frac{B_{1\tau}}{B_{2\tau}} &= \frac{\mu_1}{\mu_2} \end{aligned} \right\} \text{ — условия на границе раздела двух магнетиков}$$

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L} \text{ — энергия магнитного поля контура с током, где } L \text{ —}$$

индуктивность катушки (по определению $L = \frac{\Phi}{I}$; для соленоида

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S)$$

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi I}{2} = \frac{\Psi^2}{2L} \text{ — энергия магнитного поля катушки индуктивности}$$

$$w = \frac{dW}{dV} = \frac{HB}{2} - \text{объемная плотность энергии магнитного поля}$$

Примеры решения задач

Задача 18

Обмотка соленоида с железным сердечником содержит 500 витков. Длина сердечника равна 0.5 м. Как и во сколько раз изменится индуктивность соленоида, если сила тока, протекающего по обмотке, возрастет от 0.1 до 1 А? Использовать график зависимости индукции от напряженности магнитного поля для железа (рис.43).

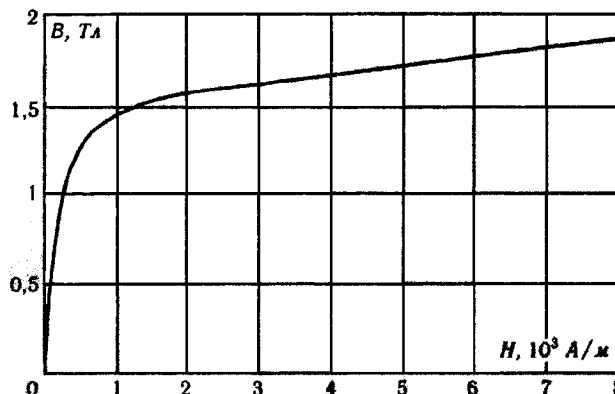


Рис.43.

Дано:

$$N=500$$

$$I_1=0.1 \text{ А}$$

$$I_2=1 \text{ А}$$

$$l=0.5 \text{ м}$$

Найти:

$$\frac{L_2}{L_1} = ?$$

Решение

По определению индуктивность катушки равна $L = \frac{\Psi}{I}$, где $\Psi = N\Phi$ – полное потокосцепление, то есть суммарный магнитный поток через все N витков катушки, $\Phi = BS$ – магнитный поток через один виток, S – площадь сечения соленоида. Индукцию магнитного поля соленоида с ферромагнитным сердечником найдём по графику (рис.43), рассчитав предварительно напряжённость поля соленоида по формуле $H = n \cdot I = \frac{N}{l} \cdot I$:

$$H_1 = \frac{N}{l} \cdot I = \frac{500}{0.5} \cdot 0.1 = 0.1 \cdot 10^3 \text{ А/м}, \quad \text{тогда по графику} \quad B_1 = 0.5 \text{ Тл};$$

$$H_2 = \frac{500}{0.5} \cdot 1 = 10^3 \text{ А/м}, \text{ и } B_2 = 1.45 \text{ Тл}. \text{ Таким образом, } \frac{L_2}{L_1} = \frac{\Psi_2/I_2}{\Psi_1/I_1} = \frac{N\Phi_2}{N\Phi_1} \cdot \frac{I_1}{I_2}, \text{ или}$$

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2 I_1}{B_1 I_2}. \text{ Подставим численные значения: } \frac{L_2}{L_1} = \frac{1.45 \cdot 1}{0.5 \cdot 0.1} = 29.$$

Ответ: индуктивность соленоида увеличится в 29 раз.

271. Железный сердечник, имеющий форму тора с круглым сечением радиуса 3 см, несёт на себе обмотку из 1000 витков, по которой течёт ток 1 А. Средний радиус тора 32 см. Найти с помощью рис.43 магнитную энергию, запасённую в сердечнике, полагая напряжённость поля одинаковой по всему сечению и равной её значению в центре сечения.

272. Замкнутый железный сердечник длиной 50 см имеет обмотку в 1000 витков. По обмотке течёт ток 1 А. Какой ток должен быть в такой же обмотке без

- сердечника, если нужно создать магнитное поле с той же индукцией? Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
273. Железный образец помещён в магнитное поле, напряжённость которого равна 1200 А/м . Найти магнитную проницаемость железа при этих условиях. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
274. Определить магнитную индукцию в замкнутом железном сердечнике тороида длиной 20 см , если по обмотке с числом витков 1500 течёт ток 1 А . Найти магнитную проницаемость железа при этих условиях. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
275. Определить величину магнитной индукции в железном сердечнике достаточно длинного соленоида, если длина соленоида 50 см , число витков 500 , сила тока 10 А . Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
276. На железный стержень длиной 50 см и сечением 2 см^2 намотан в один слой провод так, что на каждый сантиметр длины стержня приходится 20 витков. Определить энергию магнитного поля в сердечнике соленоида, если сила тока в обмотке 0.5 А . Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
277. Обмотка соленоида с железным сердечником содержит 500 витков. Длина сердечника равна 0.5 м . Как и во сколько раз изменится индуктивность соленоида, если сила тока, протекающего по обмотке, возрастет от 0.1 до 1 А ? Использовать график зависимости индукции от напряженности магнитного поля для железа (рис.43).
278. При индукции поля, равной 1 Тл плотность энергии магнитного поля в железе равна 200 Дж/м^3 . Определить магнитную проницаемость железа в этих условиях. Зависимость $B=f(H)$ неизвестна.
279. Определить объемную плотность энергии магнитного поля в стальном сердечнике, если индукция магнитного поля 0.5 Тл . Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
280. Индукция магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла с 0.5 Тл до 1 Тл . Найти, во сколько раз изменилась объемная плотность энергии магнитного поля. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
281. Вычислить плотность энергии магнитного поля в железном сердечнике замкнутого соленоида, если напряженность намагничивающего поля равна $1.2 \cdot 10^3 \text{ А/м}$. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
282. Напряженность магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла от 200 А/м до 800 А/м . Определить, во сколько раз изменилась объемная плотность энергии магнитного поля. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
283. При некоторой силе тока плотность энергии магнитного поля соленоида без сердечника 0.2 Дж/м^3 . Во сколько раз увеличится плотность энергии поля при той же силе тока, если соленоид будет иметь железный сердечник? Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
284. Найти плотность энергии магнитного поля в железном сердечнике соленоида, если напряженность намагничивающего поля равна $1.6 \cdot 10^3 \text{ А/м}$. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).

285. На соленоид длиной 144 см и диаметром 5 см надет проволочный виток. Обмотка соленоида имеет 2000 витков и по ней течет ток силой 2 А. Соленоид имеет железный сердечник. Какая средняя ЭДС индуцируется в надетом на соленоид витке, когда ток в соленоиде выключается в течение 2 мс? Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
286. Площадь поперечного сечения соленоида с железным сердечником равна 10 см^2 . Найти магнитную проницаемость материала сердечника, если магнитный поток через его поперечное сечение равен 1.4 мВб. Найти силу тока, текущего через соленоид, если индуктивность соленоида при этих условиях равна 0.44 Гн. Длина соленоида 1 м. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
287. В соленоид длиной 50 см вставлен сердечник из такого сорта железа, для которого зависимость $B=f(H)$ неизвестна. Число витков на единицу длины соленоида равно 400 м^{-1} , площадь поперечного сечения соленоида 10 см^2 . Найти магнитную проницаемость сердечника при силе тока 5 А и индуктивность соленоида, если при этих условиях магнитный поток через сечение соленоида равен 1.6 мВб.
288. Имеется соленоид с железным сердечником длиной 50 см, площадью поперечного сечения 10 см^2 и числом витков 1000. Найти индуктивность этого соленоида, если по обмотке течет ток: 1) 0.1 А; 2) 0.2 А; 3) 2 А. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.43).
289. На постоянный магнит, имеющий форму тонкого цилиндра длиной 15 см, намотали равномерно 300 витков тонкого провода. При пропускании по нему тока 3 А поле вне магнита исчезло. Найти коэрцитивную силу материала магнита.
290. Железный образец помещён в магнитное поле, напряжённость которого равна 800 А/м. Найти магнитную проницаемость железа при этих условиях. Воспользоваться графиком зависимости $B(H)$ (рис.44).
291. На рис.44 показана основная кривая намагничивания железа. Построить с помощью этого графика кривую зависимости магнитной проницаемости от напряженности поля. При каком значении напряженности проницаемость максимальна? Чему равна максимальная магнитная проницаемость?
292. Намагниченная спица подвешена на нити в горизонтальном положении и колеблется под действием магнитного поля Земли. Крутильный момент нити ничтожно мал. Как изменится период колебаний, если спицу разломить пополам и подвесить половинку?
293. По круговому контуру радиусом 40 см, погруженному в жидкий кислород, течет ток 1 А. Определите намагниченность в центре этого контура. Магнитная восприимчивость жидкого кислорода равна $3.4 \cdot 10^{-3}$.

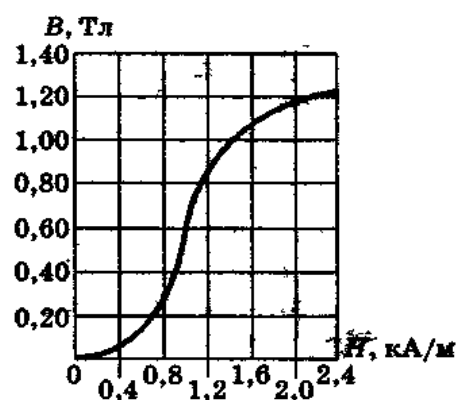


Рис.44

294. Напряженность однородного магнитного поля в платине равна 5 А/м. Определите магнитную индукцию поля, создаваемого микротоками, если магнитная восприимчивость платины равна $3.6 \cdot 10^{-4}$.

295. В однородное магнитное поле вносится длинный вольфрамовый стержень (магнитная проницаемость вольфрама 1.000176). Определите, какая доля суммарного магнитного поля в этом стержне определяется микротоками.

296. На железном сердечнике в виде тора со средним диаметром $d=70$ мм намотана обмотка с общим числом витков 600. В сердечнике сделана узкая поперечная прорезь шириной $b=1.5$ мм (рис.45). Магнитная проницаемость железа для данных условий равна 500. Определите при силе тока через обмотку 4 А напряженность магнитного поля в железе и напряженность магнитного поля в прорези.

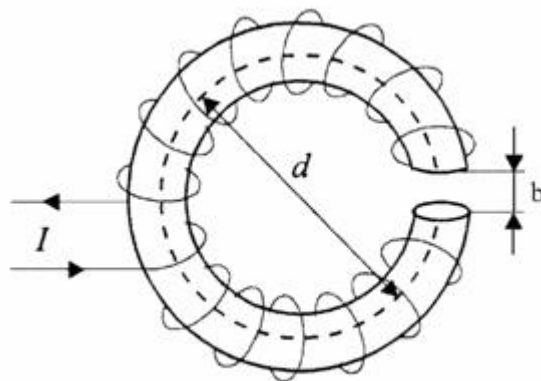


Рис.45

297. По обмотке соленоида индуктивностью 3 мГн, находящегося в диамагнитной среде, течет ток 0.4 А. Соленоид имеет длину 45 см, площадь поперечного сечения 10 см^2 и число витков 1000. Определите внутри соленоида: 1) магнитную индукцию; 2) намагниченность.

298. Длинный соленоид заполнен неоднородным парамагнетиком, магнитная восприимчивость которого зависит только от расстояния r до оси тороида как $\chi = a \cdot r^2$, где a – постоянная. На оси соленоида индукция равна B_0 . Найти зависимость от r : 1) намагниченности магнетика $J = f(r)$; 2) плотности молекулярного тока внутри магнетика $j' = f(r)$.

299. Две пластины из магнетиков с проницаемостями μ_1 и μ_2 сложены вместе и помещены в перпендикулярное к ним однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}_0$ (рис.46). Штриховой линией показана цилиндрическая поверхность с образующими, параллельными вектору $\vec{B}_0$, и основаниями площади S , параллельными границе раздела. Чему равны поток Φ_B вектора $\vec{B}$ и поток Φ_H вектора $\vec{H}$ через эту поверхность?

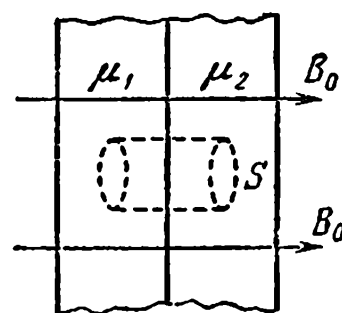


Рис.46

300. В однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}_0$ помещена бесконечная плоскопараллельная пластина из однородного изотропного магнетика с проницаемостью μ . Пластина расположена перпендикулярно к линиям $\vec{B}_0$. Определить магнитную индукцию $\vec{B}$ и напряжённость $\vec{H}$ поля в магнетике.

7. Индуктивность. Явление электромагнитной индукции

$$L = \frac{\Phi}{I}; L = \frac{\Psi}{I} - \text{определение индуктивности}$$

$$\Psi = N\Phi = LI - \text{полное потокосцепление}$$

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S - \text{индуктивность соленоида}$$

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} - \text{закон Фарадея для электромагнитной индукции}$$

$$U = vBl \sin \alpha - \text{разность потенциалов на концах движущегося проводника}$$

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} = -\frac{d\Phi}{dt} = \mathcal{E}_i - \text{циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля}$$

$$\Delta q = \frac{\Delta \Phi}{R} - \text{заряд, прошедший через поперечное сечение проводника при возникновении в нем индукционного тока}$$

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt} - \text{ЭДС самоиндукции}$$

$$\mathcal{E}_{si2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} - \text{ЭДС взаимной индукции}$$

$$L_{12} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S - \text{коэффициент взаимной индукции двух катушек на общем сердечнике}$$

$$\vec{j}_{см.} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} - \text{плотность тока смещения}$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} - \text{закон полного тока}$$

Уравнения Максвелла для электромагнитного поля

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV \quad \text{div} \vec{D} = \rho$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad \text{div} \vec{B} = 0$$

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

Примеры решения задач

Задача 19

Дано:
 $l=0.5$ м
 $\nu=2$ Гц
 $H=40$ А/м

Найти:
 $\Delta\varphi=?$

Горизонтальный металлический стержень длиной 50 см вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через один из его концов, с частотой 2 Гц. Определить разность потенциалов между концами стержня, если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна 40 А/м.

Решение

Разность потенциалов на концах стержня возникает, так как на электроны металла, движущиеся вместе со стержнем в магнитном поле, действует сила Лоренца, направленная вдоль стержня и равная $F_L = qvB \sin \alpha$, где угол между направлением скорости и индукцией магнитного поля $\alpha=90^\circ$. Действие силы Лоренца можно интерпретировать как действие эквивалентного электрического поля напряжённостью $\vec{E}_B = [\vec{v} \times \vec{B}]$. Она направлена противоположно силе Лоренца, так как заряд электрона отрицателен. Под влиянием силы Лоренца произойдёт перемещение электронов, и на концах проводника возникнет разность потенциалов $\Delta\varphi$. Возникшее электрическое поле $\vec{E}$ будет препятствовать передвижению зарядов, и их дальнейшее передвижение прекратится,

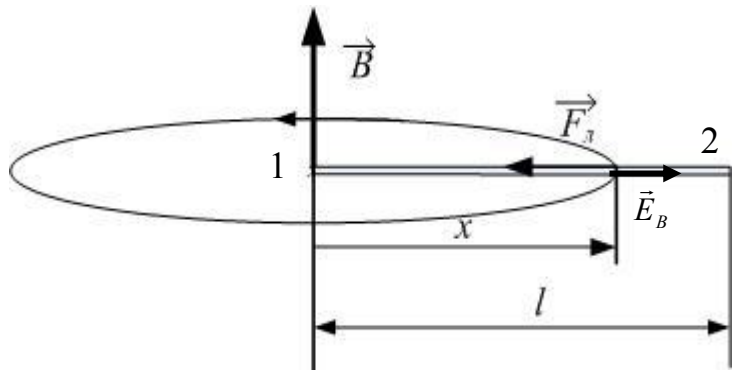


Рис.47

когда сила со стороны индуцированного электрического поля будет равна по величине, но противоположна по направлению силе Лоренца, или $\vec{E}_B = -\vec{E}$ (рис.47). Разность потенциалов связана с напряжённостью электростатического

поля: $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$, тогда $\Delta\varphi = \int_1^2 \vec{E}_B d\vec{x} = \int_0^l [\vec{v} \times \vec{B}] \cdot d\vec{x}$, или $\Delta\varphi = \int_0^l v B dl$.

Здесь интегрирование ведётся по длине стержня от точки 1 до точки 2. Линейная скорость v электрона, находящегося на расстоянии x от оси вращения, и угловая ω связаны соотношением: $v = x \cdot \omega$, тогда

$$\Delta\varphi = \int_0^l x \omega B dx = \omega B \frac{x^2}{2} \Big|_0^l = 2\pi\nu \cdot B \frac{l^2}{2} = \pi\nu \cdot B l^2.$$

Такой же результат даёт использование закона Фарадея для электромагнитной индукции: $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$, где $d\Phi$ – пересечённый магнитный поток (поток вектора магнитной индукции через поверхность dS , заметённую стержнем за время dt). Если концы стержня замкнуть проводом, находящимся вне поля, и направить нормаль к получившемуся замкнутому контуру

параллельно вектору $\vec{B}$, то при повороте стержня на угол $d\alpha = \omega \cdot dt$ площадь контура будет уменьшаться на $dS = \frac{d\alpha}{2\pi} \cdot \pi \cdot l^2$, а пересечённый магнитный поток равен $d\Phi = -B \cdot dS = -B \frac{l^2}{2} \cdot d\alpha = -\frac{Bl^2\omega}{2} dt$.

$$\text{Тогда } \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{Bl^2\omega}{2} = \frac{Bl^2 \cdot 2\pi\nu}{2} = Bl^2 \cdot \pi\nu.$$

Ту же формулу можно получить ещё более простым способом, если в качестве промежутка времени в законе Фарадея взять период вращения. Тогда $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{T}$, где $\Delta\Phi = -BS = -B\pi \cdot l^2$ – пересечённый магнитный поток через площадь круга, описанного стержнем: $S = \pi \cdot l^2$. Далее, $T = \frac{1}{\nu}$, и

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{T} = B\pi \cdot l^2 \nu.$$

Индукцию магнитного поля выразим через напряжённость: $B = \mu\mu_0 H$, тогда $\Delta\Phi = \pi\nu \cdot \mu_0 H l^2$ (магнитная проницаемость среды $\mu = 1$). Подставим численные значения: $\Delta\Phi = 3.14 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot 40 \cdot 0.5^2 = 79 \cdot 10^{-6} \text{ В} = 79 \text{ мВ}$.

Ответ: $\Delta\Phi = 79 \text{ мВ}$.

Задача 20

Проводник длиной 60 см и сопротивлением 0.02 Ом под действием силы Ампера движется в магнитном поле с индукцией 1.6 Тл равномерно со скоростью 50 см/с по медным шинам. Шины подключены к источнику ЭДС 0.96 В и внутренним сопротивлением 0.01 Ом. Поле перпендикулярно плоскости, в которой лежат шины. Определить: 1) силу тока в цепи; 2) мощность, развиваемую движущимся проводником; 3) мощность, расходуемую на нагревание проводника.

Решение

Дано:

$l=0.6 \text{ м}$
 $R=0.02 \text{ Ом}$
 $B=1.6 \text{ Тл}$
 $v=0.5 \text{ м/с}$
 $\mathcal{E}=0.96 \text{ В}$
 $r=0.01 \text{ Ом}$

Найти:

$I=?$
 $P_{\text{ДВ}}=?$
 $P_{\text{НАГР}}=?$

На проводник действует сила Ампера, равная $\vec{F}_A = I[\vec{l} \times \vec{B}]$; её величина $F_A = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha$, где $\alpha = 90^\circ$ – угол между направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ и элементом тока $I \cdot \vec{l}$, а направление можно найти по правилу левой руки (рис.48). Сила тока по закону Ома для замкнутой цепи равна $I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_i}{R + r}$, где $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ – ЭДС индукции,

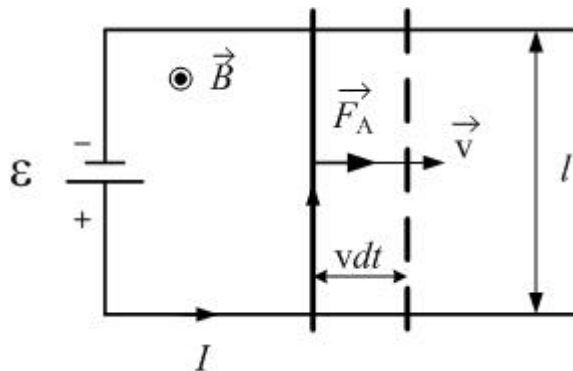


Рис.48

возникающая при изменении площади контура, и, соответственно, при изменении магнитного потока через площадь контура. За время dt проводник переместится на расстояние $v \cdot dt$, площадь контура увеличится на $dS = l \cdot v \cdot dt$, а магнитный поток – на $d\Phi = BdS = B \cdot l \cdot v \cdot dt$. Таким образом, $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{Blvdt}{dt} = -Blv$,

$$I = \frac{\mathcal{E} - Blv}{R + r}, \quad F_A = \frac{\mathcal{E} - Blv}{R + r} \cdot l \cdot B. \quad \text{Мощность, развиваемая движущимся}$$

проводником, – мощность силы Ампера – равна: $P_{ДВ} = \frac{F_A \cdot v \cdot dt}{dt} = F_A \cdot v = I \cdot lBv$.

Мощность, расходуемую на нагревание проводника, найдём по закону Джоуля-Ленца: $P_{НАГР} = \frac{dQ_{Д-Л}}{dt} = \frac{I^2 R \cdot dt}{dt} = I^2 R$.

Подставим численные значения: $I = \frac{\mathcal{E} - Blv}{R + r} = \frac{0.96 - 1.6 \cdot 0.6 \cdot 0.5}{0.02 + 0.01} = 16 \text{ A};$

$$P_{ДВ} = I \cdot lBv = 16 \cdot 0.6 \cdot 1.6 \cdot 0.5 = 7.68 \text{ Вт}; \quad P_{НАГР} = I^2 R = 16^2 \cdot 0.02 = 5.12 \text{ Вт}.$$

Можно проверить полученные результаты, используя закон сохранения энергии: полная мощность, даваемая источником, равна $P_{ПОЛН} = P_{ДВ} + P_{НАГР} + P'_{НАГР}$. Здесь $P'_{НАГР} = I^2 r = 16^2 \cdot 0.01 = 2.56 \text{ Вт}$ – мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении источника тока, а $P_{ПОЛН} = \mathcal{E} \cdot I = 0.96 \cdot 16 = 15.36 \text{ Вт}$. Таким образом, получаем верное равенство: $7.68 + 5.12 + 2.56 = 15.36$.

Ответ: $I = 16 \text{ A}; P_{ДВ} = 7.68 \text{ Вт}; P_{НАГР} = 5.12 \text{ Вт};$

Задача 21

Определить силу тока смещения между квадратными пластинами конденсатора со стороной 5 см, если напряженность электрического поля изменяется со скоростью $4.52 \text{ МВ}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Дано:

$$\frac{dE}{dt} = 4.52 \cdot 10^6 \text{ В}/(\text{м} \cdot \text{с})$$

$$a = 0.05 \text{ м}$$

Найти:

$$I_{\text{СМ}} = ?$$

Решение

По определению плотность тока смещения $\vec{j}_{\text{см.}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$, а вектор электрического смещения связан с напряжённостью электрического поля соотношением $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$, тогда $\vec{j}_{\text{см.}} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$. Диэлектрическая

проницаемость $\varepsilon = 1$. Силу тока смещения, протекающего между обкладками конденсатора, найдём из определения плотности тока: $j = \frac{I}{S}$, где $S = a^2$ – площадь обкладок. Таким образом, $I_{\text{СМ}} = j_{\text{СМ}} \cdot S = \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} a^2$. Подставим численные значения:

$$I_{\text{СМ}} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 4.52 \cdot 10^6 \cdot 0.05^2 = 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Ответ: $I_{CM} = 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 0.1 \text{ мкА}$.

301. На немагнитный каркас длиной 50 см и площадью сечения 3 см^2 намотан в один слой провод диаметром 0.4 мм (витки вплотную). Найти индуктивность соленоида, полное потокосцепление и магнитный поток, пронизывающий поперечное сечение соленоида при силе тока 1 А.
302. Соленоид содержит 4000 витков провода, по которому течет ток силой 20 А. Определить магнитный поток и потокосцепление, если индуктивность 0.4 Гн.
303. Индуктивность соленоида, намотанного в один слой на немагнитный каркас, составляет $0.5 \cdot 10^{-3}$ Гн. Длина соленоида 0.6 м, диаметр 0.02 м. Определить число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.
304. Соленоид содержит 600 витков. При силе тока 10 А магнитный поток равен $80 \cdot 10^{-6}$ Вб. Определить индуктивность соленоида и потокосцепление.
305. Соленоид индуктивностью $4 \cdot 10^{-3}$ Гн содержит 600 витков. Определить магнитный поток и потокосцепление, если сила тока, протекающего по обмотке, равна 12 А.
306. Индуктивность катушки без сердечника равна 0.02 Гн. Какое потокосцепление создается, когда по обмотке течет ток силой 5 А? К катушке последовательно присоединили еще одну такую же при неизменном напряжении в цепи. Какова станет индуктивность? Каким будет потокосцепление?
307. Длинная прямая катушка, намотанная на немагнитный каркас, имеет 1000 витков и индуктивность $3 \cdot 10^{-3}$ Гн. Какой магнитный поток и потокосцепление создаёт катушка при токе силой 1 А? Катушку укоротили втрое, оставив неизменными плотность намотки и напряжение в цепи. Найти индуктивность и потокосцепление.
308. Соленоид, площадь сечения которого равна $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, содержит 1200 витков. Индукция магнитного поля внутри соленоида при токе силой 2 А равна 0.01 Тл. Определить индуктивность соленоида.
309. На картонный каркас длиной 0.50 м и площадью сечения, равной $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, намотан в один слой провод диаметром $0.2 \cdot 10^{-3}$ м так, что витки плотно прилегают друг к другу (толщиной изоляции пренебречь). Вычислить индуктивность получившегося соленоида.
310. Индуктивность соленоида длиной 1 м, намотанного в один слой на немагнитный каркас, равна $1.6 \cdot 10^{-3}$ Гн. Площадь сечения соленоида равна $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Определить число витков на каждом сантиметре длины соленоида.
311. Сколько витков проволоки диаметром $0.4 \cdot 10^{-3}$ м с изоляцией ничтожной толщины нужно намотать на картонный цилиндр диаметром 0.02 м, чтобы получить однослойную катушку с индуктивностью 10^{-3} Гн? Витки вплотную прилегают друг к другу.
312. Катушка, намотанная на немагнитный цилиндрический каркас, имеет 750 витков и индуктивность $25 \cdot 10^{-3}$ Гн. Чтобы увеличить индуктивность катушки до $36 \cdot 10^{-3}$ Гн, обмотку с катушки сняли и заменили обмоткой из

- более тонкой проволоки с таким расчетом, чтобы длина катушки осталась прежней. Определить число витков катушки после перемотки.
313. Катушка, намотанная на немагнитный цилиндрический каркас, имеет индуктивность $36 \cdot 10^{-3}$ Гн. Чтобы увеличить индуктивность, длину катушки увеличили при прежней плотности намотки в 2.78 раза. Какова индуктивность получившейся катушки?
 314. На картонный каркас длиной 0.8 м и диаметром 0.04 м намотан в один слой провод диаметром $0.25 \cdot 10^{-3}$ м так, что витки плотно прилегают друг к другу. Вычислить индуктивность получившегося соленоида.
 315. Индуктивность соленоида, намотанного в один слой на немагнитный каркас, равна $0.5 \cdot 10^{-3}$ Гн. Длина соленоида 0.6 м, диаметр 0.02 м. Определить число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.
 316. Определить индуктивность двухпроводной линии на участке длиной 10^3 м. Радиус провода 10^{-3} м, расстояние между осями линиями 0.4 м. Указание: учесть только внутренний магнитный поток, т.е. поток, пронизывающий контур, ограниченный проводами.
 317. Найти индуктивность единицы длины двухпроводной линии, если радиус каждого провода в η раз меньше расстояния между их осями. Поле внутри проводов пренебречь, магнитную проницаемость всюду считать равной единице и $\eta \gg 1$.
 318. Две одинаковые катушки, каждая индуктивностью L , соединяют последовательно. Считая взаимную индуктивность катушек пренебрежимо малой, найти индуктивность системы.
 319. Две одинаковые катушки, каждая индуктивностью L , соединяют параллельно. Считая взаимную индуктивность катушек пренебрежимо малой, найти индуктивность системы.
 320. Рамка, имеющая форму равностороннего треугольника, помещена в однородное магнитное поле напряженностью 6400 А/м. Перпендикуляр к плоскости рамки составляет угол 30° с направлением магнитного поля. Определить длину стороны рамки, если среднее значение ЭДС индукции, возникающей в рамке при выключении поля в течение времени 30 мс, равно 10 мВ.
 321. В однородном магнитном поле находится виток площадью 10 см^2 , расположенный перпендикулярно силовым линиям. Какой ток потечет по витку, если поле будет убывать с постоянной скоростью 8 кА/(м·с)? Сопротивление витка 1 Ом.
 322. Рамка площадью 400 см^2 , имеющая 100 витков, вращается в однородном магнитном поле с индукцией 0.01 Тл. Период обращения рамки 0.1 с. Определить максимальное значение ЭДС индукции в рамке. Ось вращения перпендикулярна линиям индукции.
 323. Горизонтальный тонкий металлический стержень длиной 75 см вращается вокруг вертикальной оси, проходящей на расстоянии 25 см от одного из концов, с частотой 2 Гц. Определить разность потенциалов между концами стержня, если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна 40 А/м.

324. Плоская рамка площадью 100 см^2 , содержащая 20 витков провода, вращается в однородном магнитном поле с индукцией 100 мТл. Амплитуда ЭДС индукции равна 10 В. Определить частоту вращения.
325. С какой скоростью должен двигаться проводник длиной 10 см перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, напряженность которого 160 кА/м, чтобы между концами проводника возникла разность потенциалов 10 мВ? Направление скорости проводника с направлением самого проводника составляет угол 30° . Силовые линии перпендикулярны проводнику.
326. Плоская проволочная рамка, состоящая из одного витка, имеющего сопротивление 1 мОм и площадь 1 см^2 , находится в однородном магнитном поле. Направление силовых линий поля перпендикулярно плоскости рамки. Индукция магнитного поля изменяется со скоростью $10 \text{ мВб}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Какое количество теплоты выделится в рамке за 1 с?
327. С какой угловой скоростью надо вращать прямой проводник вокруг одного из его концов в однородном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной к силовым линиям поля, чтобы в проводнике возникла ЭДС, равная 0.3 В? Длина проводника 20 см, напряженность магнитного поля 160 кА/м.
328. В однородном магнитном поле с индукцией 0.4 Тл в плоскости, перпендикулярной линиям индукции поля, вращается стержень длиной 10 см. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определить разность потенциалов на концах стержня при частоте вращения 16 Гц.
329. Индукция магнитного поля между полюсами двухполюсного генератора 0.8 Тл. Ротор имеет 100 витков площадью 400 см^2 . Сколько оборотов в минуту делает якорь, если максимальное значение ЭДС индукции равно 200 В?
330. Проводник длиной 15 см помещен в перпендикулярное проводнику магнитное поле с индукцией 2 Тл. Концы проводника замкнуты проводом, находящимся вне поля. Сопротивление всей цепи 0.5 Ом. Какую мощность необходимо затратить, чтобы двигать проводник перпендикулярно линиям индукции и проводнику со скоростью 10 м/с?
331. Проводник длиной 60 см и сопротивлением 0.02 Ом под действием силы Ампера движется в магнитном поле с индукцией 1.6 Тл равномерно со скоростью 50 см/с по медным шинам. Шины подключены к источнику ЭДС 0.96 В и внутренним сопротивлением 0.01 Ом. Поле перпендикулярно плоскости, в которой лежат шины. Определить: 1) силу тока в цепи; 2) мощность, развиваемую движущимся проводником; 3) мощность, расходуемую на нагревание проводника.
332. Рамка с площадью $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ равномерно вращается с частотой 10 Гц относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля с индукцией 0.2 Тл. Каково среднее значение ЭДС индукции за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от 0 до максимального значения?
333. В однородном магнитном поле с индукцией 0.35 Тл равномерно с частотой 480 Гц вращается рамка из 1500 витков площадью $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Ось вращения

- лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Определить максимальную ЭДС индукции, возникающую в рамке.
334. Рамка с площадью $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ содержит 1000 витков провода сопротивлением 12 Ом. К концам обмотки подключено внешнее сопротивление 20 Ом. Рамка равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией 0.1 Тл с частотой 8 Гц. Определить максимальную мощность переменного тока в цепи.
335. Короткая катушка из 100 витков равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией 0.4 Тл. Угловая скорость 5 рад/с относительно оси, совпадающей с диаметром катушки и перпендикулярной линиям индукции поля. Определить мгновенное значение ЭДС индукции для тех моментов времени, когда плоскость катушки составляет угол 60° с линиями индукции поля. Площадь катушки равна $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.
336. В однородном магнитном поле с индукцией 0.5 Тл вращается с частотой 10 Гц стержень длиной 0.20 м. Ось вращения параллельна линиям индукции и проходит через один из концов стержня перпендикулярно его оси. Определить разность потенциалов на концах стержня.
337. Прямой провод длиной 0.40 м движется в однородном магнитном поле со скоростью 5 м/с перпендикулярно линиям индукции. Разность потенциалов между концами провода 0.6 В. Вычислить индукцию магнитного поля.
338. В однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл находится прямой провод длиной 0.2 м, концы которого замкнуты вне поля. Сопротивление всей цепи равно 0.1 Ом. Найти силу, которую нужно приложить к проводу, чтобы перемещать его перпендикулярно линиям индукции со скоростью 2.5 м/с.
339. Прямой провод длиной 0.1 м помещен в однородное магнитное поле с индукцией 1 Тл. Концы его замкнуты гибким проводом, находящимся вне поля. Сопротивление всей цепи 0.4 Ом. Какая мощность потребуется для того, чтобы двигать провод перпендикулярно линиям индукции со скоростью 20 м/с?
340. Обмотка соленоида состоит из слоя плотно прилегающих друг к другу витков медного провода. Диаметр провода 0.2 мм, диаметр соленоида 5 см. По соленоиду течет ток 1 А. Какой заряд протечет через обмотку, если концы ее замкнуть накоротко?
341. В середине основания тонкого длинного соленоида (сила тока 5 А, число витков на единицу длины 200 см^{-1}) помещена маленькая рамка площадью 1 см^2 и сопротивлением 5 Ом, состоящая из 100 витков. Какой заряд пройдет через рамку, если ее перенести в центр соленоида?
342. Рамка, имеющая 1000 витков площадью 5 см^2 , замкнута на гальванометр с сопротивлением 10 мОм. Рамка находится в однородном магнитном поле с индукцией 10^{-2} Тл, причем линии поля перпендикулярны ее плоскости. Какой заряд протечет по цепи гальванометра, если направление магнитного поля изменилось на противоположное?
343. В однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл расположена замкнутая катушка диаметром 5 см с числом витков 500. Плоскость катушки перпендикулярна линиям поля. Какой заряд пройдет по цепи катушки, если

- ее повернуть на 180^0 ? Проволока, из которой изготовлена катушка, имеет площадь сечения 0.1 мм^2 и удельное сопротивление $1.7 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.
344. Кольцо из проволоки сопротивлением 10^{-3} Ом находится в однородном магнитном поле с индукцией 0.4 Тл . Плоскость кольца составляет угол 90^0 с линиями индукции. Определить заряд, который протечет по кольцу, если его выдернуть из поля. Площадь кольца 10^{-3} м^2 .
345. Рамка из провода сопротивлением 0.04 Ом равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией 0.6 Тл . Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Площадь рамки $2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. Определить заряд, который протечет по рамке при изменении угла между нормалью к рамке и линиями индукции: а) от 0^0 до 45^0 ; б) от 45^0 до 90^0 .
346. Проволочный виток радиусом 0.04 м с сопротивлением 0.01 Ом находится в однородном магнитном поле с индукцией 0.04 Тл . Плоскость рамки составляет угол 30^0 с линиями индукции поля. Какой заряд протечет по витку, если магнитное поле исчезнет?
347. Проволочное кольцо радиусом 0.1 м лежит на столе. Какой заряд протечет по кольцу, если его повернуть с одной стороны на другую? Сопротивление кольца 1 Ом . Вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли равна $5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.
348. В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. По цепи протек заряд $1 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$. Определить магнитный поток, пересеченный кольцом, если сопротивление цепи гальванометра равно 30 Ом .
349. Между полюсами электромагнита помещена катушка, соединенная с баллистическим гальванометром. Ось катушки параллельна линиям индукции. Катушка сопротивлением 4 Ом имеет 15 витков площадью $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Сопротивление гальванометра 46 Ом . Когда ток в обмотке электромагнита выключили, по цепи гальванометра протек заряд $9 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$. Вычислить магнитную индукцию поля электромагнита.
350. Тонкий медный провод массой 1 г согнут в виде квадрата, и концы его замкнуты. Квадрат помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0.1 Тл так, что плоскость его перпендикулярна линиям индукции поля. Определить заряд, который протечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию. Плотность меди $8.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, удельное сопротивление меди $1.7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.
351. На расстоянии 1 м от длинного прямого провода с током силой 1000 А находится кольцо радиусом 0.01 м . Кольцо расположено так, что поток, пронизывающий его, максимален. Определить заряд, который протечет по кольцу, когда ток в проводнике будет выключен. Сопротивление кольца 10 Ом . Поле в пределах кольца считать однородным.
352. По длинному прямому проводу течет ток. Вблизи провода расположена квадратная рамка из тонкого провода сопротивлением 0.02 Ом с длиной стороны 0.1 м . Провод лежит в плоскости рамки и параллелен двум ее сторонам, расстояния до которых от провода соответственно равны 0.1 и 0.2

- м. Найти силу тока в проводе, если при его включении через рамку протек заряд $693 \cdot 10^{-3}$ Кл.
353. Магнитный поток через неподвижный контур с сопротивлением 90 Ом изменяется в течение 30 с по закону: $\Phi = a(15 - t^2)$, где t выражено в секундах, Φ – в Вб, константа $a = 5 \frac{\text{Вб}}{\text{с}^2}$. Найти количество теплоты, выделенное в контуре за это время. Индуктивностью контура пренебречь.
354. Средняя скорость изменения магнитного потока в бетатроне, рассчитанном на энергию $60 \cdot 10^6$ эВ, составляет 50 Вб/с. Определить число оборотов электрона на орбите за время ускоренного движения и путь, пройденный электроном, если радиус орбиты 0.20 м.
355. В бетатроне скорость изменения магнитной индукции 60 Тл/с. Определить напряженность вихревого электрического поля на орбите электрона, если ее радиус 0.5 м.
356. Электрон в бетатроне движется по орбите радиусом 0.4 м и приобретает за один оборот кинетическую энергию 20 эВ. Вычислить скорость изменения магнитной индукции, считая эту скорость в течение интересующего нас промежутка времени постоянной.
357. Соленоид содержит 1000 витков. Площадь сечения сердечника равна 10^{-3} м^2 . В обмотке течет ток, создающий поле с индукцией 1.5 Тл. Найти среднюю ЭДС индукции, возникающую в соленоиде, если ток уменьшился до нуля за время $5 \cdot 10^{-4}$ с.
358. По катушке, индуктивность которой равна $0.3 \cdot 10^{-4}$ Гн, течет ток силой 0.6 А. При размыкании цепи сила тока изменяется практически до нуля за время $12 \cdot 10^{-5}$ с. Определить среднюю электродвижущую силу самоиндукции, возникающую в контуре.
359. Индуктивность катушки равна $2 \cdot 10^{-3}$ Гн. Ток частотой 50 Гц, протекающий по катушке, изменяется по синусоидальному закону. Определить среднюю ЭДС самоиндукции, возникающую за интервал времени, в течение которого ток в катушке изменяется от минимального до максимального значения. Амплитудное значение силы тока 10 А.
360. Силу тока в контуре равномерно увеличивают при помощи реостата на 0.6 А в секунду. Найти среднее значение ЭДС самоиндукции, если индуктивность катушки $5 \cdot 10^{-3}$ Гн.
361. Две катушки расположены на небольшом расстоянии одна от другой. Когда сила тока в первой катушке изменяется с быстротой 5 А/с, во второй катушке возникает ЭДС индукции 0.1 В. Определить коэффициент взаимной индукции катушки.
362. Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет 251 виток. Средний диаметр тороида равен 0.08 м, диаметр витков равен 0.02 м. На тороид намотана вторичная обмотка, имеющая 100 витков. При замыкании первичной обмотки в ней в течение 10^{-3} с устанавливается ток силой 3 А. Найти среднюю ЭДС индукции, возникающей на вторичной обмотке.

363. Две катушки намотаны на один общий сердечник. Индуктивность первой катушки 0.2 Гн, второй – 0.8 Гн, сопротивление второй катушки 600 Ом. Какой ток потечет во второй катушке, если ток в 0.3 А, текущий в первой катушке, выключить в течение 1 мс?
364. Две катушки имеют взаимную индуктивность, равную 5 мГн. В первой катушке сила тока изменяется по закону: $I = I_0 \sin(\omega t)$, где $I_0 = 10$ А, период колебаний тока равен 0.02 с. Найти зависимость от времени: 1) ЭДС, индуцируемой во второй в катушке; 2) наибольшее значение этой ЭДС.
365. Две одинаковые катушки, каждая индуктивностью L , соединены последовательно и расположены так близко друг от друга, что магнитный поток одной катушки полностью пронизывает другую, усиливая ее магнитное поле. Найти индуктивность системы из этих двух катушек.
366. Две одинаковые катушки, каждая индуктивностью L , соединены последовательно. Считая взаимную индуктивность пренебрежимо малой, найти индуктивность системы.
367. Две одинаковые катушки, каждая индуктивностью L , соединены параллельно. Считая взаимную индуктивность пренебрежимо малой, найти индуктивность системы.
368. Два соленоида одинаковой длины и почти одинакового сечения вставлены полностью один в другой. Найти их взаимную индуктивность, если их индуктивности равны L_1 и L_2 .
369. Точечный заряд q движется с постоянной нерелятивистской скоростью v . Найти плотность тока смещения в точке, находящейся на расстоянии r от заряда на прямой, совпадающей с траекторией заряда.
370. Точечный заряд q движется с постоянной нерелятивистской скоростью v . Найти плотность тока смещения в точке, находящейся на расстоянии r от заряда на прямой, перпендикулярной к траектории и проходящей через заряд.
371. Длинный прямой соленоид имеет n витков на единицу длины. По нему течет переменный ток $I = I_0 \sin(\omega t)$. Найти плотность тока смещения как функцию расстояния r от оси соленоида. Радиус сечения соленоида R . Рассмотреть случаи $r < R$ и $r > R$.
372. Определить силу тока смещения между квадратными пластинами конденсатора со стороной 5 см, если напряженность электрического поля изменяется со скоростью 4.52 МВ/(м·с).
373. Ток, проходящий по обмотке длинного прямого соленоида с радиусом R меняется так, что магнитное поле внутри соленоида растет со временем по закону $B = At^2$. Определить плотность тока смещения как функцию расстояния r от оси соленоида. Рассмотреть случаи $r < R$ и $r > R$.
374. Определить индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником, имеющей 800 витков. Длина катушки 25 см, диаметр витков 4 см. Сила тока в катушке 1 А. Чему равен магнитный поток сквозь поперечное сечение катушки? Какова энергия магнитного поля катушки?

375. В катушке без сердечника за 0.01 с ток возрос от 1 А до 2 А, при этом в катушке возникла ЭДС самоиндукции 20 В. Определить индуктивность катушки и изменение энергии магнитного поля катушки.
376. Однослойная обмотка тороида без сердечника выполнена из проволоки диаметром 0.6 мм. Длина тороида 60 см (считая по оси тороида), площадь поперечного сечения 15 см^2 . По обмотке течет ток 2 А. За время 50 мкс в обмотке выделяется количество теплоты, равное энергии магнитного поля внутри тороида. Найти напряжение, поданное на обмотку тороида.
377. Определить индуктивность катушки, имеющей 800 витков. Длина катушки 25 см, диаметр витков 4 см. По катушке идет ток 1 А. Чему равен магнитный поток сквозь виток катушки? Чему равно потокоцепление? Какова энергия магнитного поля?
378. Соленоид с сердечником из немагнитного материала содержит 1200 витков провода, плотно прилегающих друг к другу. При силе тока 4 А магнитный поток сквозь виток катушки равен 6 мкВб. Определить индуктивность соленоида и энергию магнитного поля.
379. В соленоиде без сердечника, содержащем 720 витков, сила тока увеличивается на 10 А за 0.12 с и при этом возрастает магнитный поток от 1.6 до 4.1 мВб. Определить индуктивность соленоида, ЭДС самоиндукции и энергию магнитного поля внутри соленоида при силе тока в нем 6 А.
380. Обмотка электромагнита имеет сопротивление 10 Ом и индуктивность 0.2 Гн и находится под постоянным напряжением. В течение какого промежутка времени в обмотке выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля?
381. Соленоид содержит 1000 витков. Сила тока в его обмотке равна 1 А, магнитный поток через поперечное сечение соленоида $0.1 \cdot 10^{-3}$ Вб. Вычислить энергию магнитного поля.
382. В соленоиде сечением $0.05 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ создан магнитный поток $2 \cdot 10^{-7}$ Вб. Определить объемную плотность энергии магнитного поля соленоида. Сердечник отсутствует. Магнитное поле во всем объеме соленоида считать однородным.
383. Магнитный поток в соленоиде, содержащем 1000 витков, равен $0.2 \cdot 10^{-3}$ Вб. Определить энергию магнитного поля соленоида, если сила тока, протекающего по виткам соленоида, 1 А. Сердечник отсутствует. Магнитное поле во всем объеме соленоида считать однородным.
384. Диаметр тороида (по средней линии) 0.50 м. Тороид содержит 2000 витков и имеет площадь сечения $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Вычислить энергию магнитного поля тороида при силе тока 5 А. Считать магнитное поле тороида однородным. Сердечник выполнен из немагнитного материала.
385. По проводнику, изогнутому в виде кольца радиусом 0.20 м, содержащему 500 витков, течет ток силой 1 А. Определить объемную плотность энергии магнитного поля в центре кольца.
386. Соленоид имеет длину 0.6 м и сечение 10^{-3} м^2 . При некоторой силе тока, протекающего по обмотке, в соленоиде создается магнитный поток $0.1 \cdot 10^{-3}$

- Вб. Чему равна энергия магнитного поля соленоида? Сердечник выполнен из немагнитного материала, магнитное поле однородно.
387. Магнитный поток в соленоиде, содержащем 1000 витков, равен $0.2 \cdot 10^{-3}$ Вб. Определить энергию магнитного поля соленоида, если сила тока, протекающего по виткам соленоида, 1 А. Сердечник отсутствует. Магнитное поле считать однородным.
388. Обмотка тороида имеет 10 витков на каждый сантиметр длины (по средней линии тороида). Вычислить объемную плотность энергии магнитного поля при силе тока 10 А. Сердечник выполнен из немагнитного материала и магнитное поле во всем объеме однородно.
389. Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет 10 витков на каждый см длины. Определить плотность энергии поля, если по обмотке течет ток силой 16 А.
390. Обмотка тороида содержит 10 витков на каждый сантиметр длины. Сердечник немагнитный. При какой силе тока в обмотке плотность энергии магнитного поля равна 1 Дж/м³?

8. R-L –цепочка. Колебательный контур

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \text{ – сила тока при замыкании } R\text{-}L\text{-цепочки}$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \text{ – сила тока при размыкании } R\text{-}L\text{-цепочки}$$

а) Колебательный контур. Свободные колебания

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2} \text{ – закон сохранения энергии}$$

$$q'' + \frac{1}{LC}q = 0 \text{ – дифференциальное уравнение свободных колебаний}$$

$q = q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ – зависимость заряда на конденсаторе от времени при свободных незатухающих колебаниях в колебательном контуре

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \text{ – период колебаний в колебательном контуре}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ – круговая частота свободных колебаний в колебательном контуре}$$

$\lambda = cT$ – длина волны, на которую настроен колебательный контур (c – скорость света в вакууме)

б) Колебательный контур. Затухающие колебания

$$q'' + \frac{R}{L}q' + \frac{1}{LC}q = 0 \text{ – дифференциальное уравнение затухающих колебаний}$$

$q = q_0 e^{-\beta \cdot t} \cos(\omega_{\text{зам.}} \cdot t + \varphi_0)$ – зависимость заряда на конденсаторе от времени при затухающих колебаниях в колебательном контуре

$\beta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания

$\omega_{\text{зат.}} = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний

$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}$ – определение логарифмического декремента затухания

$\lambda = \beta T$ – связь логарифмического декремента и коэффициента затухания

$Q = \frac{\pi}{\lambda}$ – добротность колебательного контура

в) Колебательный контур. Вынужденные колебания (цепь переменного тока)

$q'' + \frac{R}{L}q' + \frac{1}{LC}q = \frac{U_0}{L}\cos(\omega t)$ – дифференциальное уравнение вынужденных колебаний для последовательной цепи переменного тока

$I = I_0 \cos(\omega t - \varphi)$ – зависимость силы тока от времени для последовательной цепи переменного тока

$I_0 = \frac{U_0}{Z}$ – закон Ома для переменного тока

$R_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивление

$R_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление

$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ – полное сопротивление цепи переменного тока

$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ – тангенс сдвига фаз между током и напряжением в цепи переменного тока

г) Мощность в цепи переменного тока

$P = I_{\text{эфф.}} U_{\text{эфф.}} \cos \varphi$ – мощность в цепи переменного тока

$I_{\text{эфф.}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, U_{\text{эфф.}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ – эффективные (действующие) величины тока и напряжения.

Примеры решения задач

Задача 13

Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 2.66 нФ и катушки без сердечника, намотанной из медного провода диаметром 0.5 мм (витки вплотную, толщиной изоляции пренебречь). Длина катушки 20 см. Найти логарифмический декремент затухающих колебаний. Удельное сопротивление меди равно $1.7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Дано:
 $C=2.66 \cdot 10^{-9}$ Ф
 $d=0.5 \cdot 10^{-3}$ м
 $l=0.2$ м
 $\rho=1.7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м
 $\mu=1$

Найти:
 $\lambda=?$

Решение

Логарифмический декремент затухания выразим через период затухающих колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega_3} \quad (1)$$

и коэффициент затухания

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (2)$$

$$\lambda = \beta \cdot T, \quad (3)$$

а циклическую частоту ω_3 затухающих колебаний – через собственную частоту контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

$$\omega_3 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (5)$$

Здесь R – активное сопротивление катушки, а L – её индуктивность:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S. \quad (6)$$

Число витков катушки равно $N = \frac{l}{d}$, так как витки расположены вплотную и изоляция провода ничтожно мала. Площадь сечения катушки выразим через её радиус r : $S = \pi \cdot r^2$. Тогда из (6) получим: $L = \mu\mu_0 \frac{l^2}{d^2 l} \pi \cdot r^2$, или

$$L = \mu\mu_0 \frac{l}{d^2} \pi \cdot r^2. \quad (7)$$

Активное сопротивление R катушки определяется длиной провода $l_{\text{ПР}} = N \cdot 2\pi \cdot r$ ($2\pi \cdot r$ – длина одного витка) и его сечением $S_{\text{ПР}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$:

$$R = \rho \cdot \frac{l_{\text{ПР}}}{S_{\text{ПР}}} = \rho \frac{N \cdot 2\pi \cdot r}{\pi \cdot d^2 / 4}, \text{ или } R = \rho \frac{N \cdot 8 \cdot r}{d^2} = \rho \frac{l}{d} \cdot \frac{8 \cdot r}{d^2} = \frac{8\rho \cdot l \cdot r}{d^3}. \text{ Таким образом,}$$

$$\text{из (2) и (7) получим: } \beta = \frac{R}{2L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{8\rho \cdot l \cdot r}{d^3} \cdot \frac{d^2}{\mu_0 l \cdot \pi \cdot r^2}; \text{ или } \beta = \frac{4\rho}{d \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot r}. \quad (8)$$

Теперь выразим частоту собственных колебаний из (4) и (7):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{d^2}{C\mu_0 l \pi \cdot r^2}}; \quad \omega_0 = \frac{d}{r \cdot \sqrt{C\mu_0 l \cdot \pi}}; \text{ а затем – частоту затухающих}$$

$$\text{колебаний из (5) и (8): } \omega_3 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{d^2}{r^2 C\mu_0 l \cdot \pi} - \frac{16\rho^2}{(d\mu_0 \pi)^2 \cdot r^2}};$$

$$\omega_3 = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{d^2}{C\mu_0 l \cdot \pi} - \frac{16\rho^2}{(d\mu_0\pi)^2}}. \quad (9)$$

Уравнения (1), (3) и (9) дают:

$$\lambda = \beta \cdot T = \beta \frac{2\pi}{\omega_3}, \quad \lambda = \frac{4\rho}{d \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{2\pi \cdot r}{\sqrt{\frac{d^2}{C\mu_0 l \pi} - \frac{16\rho^2}{(d\mu_0\pi)^2}}}.$$

$$\text{Окончательно: } \lambda = \frac{8\rho}{d \cdot \mu_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{d^2}{C\mu_0 l \pi} - \frac{16\rho^2}{(d\mu_0\pi)^2}}}, \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{8}{\sqrt{\frac{d^4 \mu_0}{Cl\pi\rho^2} - \frac{16}{\pi^2}}}.$$

$$\text{Подставим численные значения: } \lambda = \frac{8}{\sqrt{\frac{(5 \cdot 10^{-4})^4 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2.66 \cdot 10^{-9} \cdot 0.2\pi (1.7 \cdot 10^{-8})^2} - \frac{16}{\pi^2}}} = 0.0198.$$

Ответ: $\lambda = 0.0198 \approx 0.02$.

Задача 22

В цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц включены последовательно емкость 35.4 мкФ, активное сопротивление 100 Ом и индуктивность 0.7 Гн. Найти силу тока и падение напряжения на емкости, активном сопротивлении и индуктивности.

Дано:

$U_{\text{ЭФФ}} = 220 \text{ В}$
 $\nu = 50 \text{ Гц}$
 $C = 35.4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
 $R = 100 \text{ Ом}$
 $L = 0.7 \text{ Гн}$

Найти:

$I_{\text{ЭФФ}} = ?$
 $U_{0C} = ?$
 $U_{0R} = ?$
 $U_{0L} = ?$

Решение

По закону Ома для переменного тока: $I_0 = \frac{U_0}{Z}$, где

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad - \text{ полное сопротивление цепи}$$

переменного тока. Амплитудные значения напряжения и тока

связаны с эффективными формулами: $U_{\text{ЭФФ}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ и

$I_{\text{ЭФФ}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$, а циклическая частота равна: $\omega = 2\pi\nu$. Тогда

$$I_{\text{ЭФФ}} = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{Z}, \quad \text{или}$$

$$I_{\text{ЭФФ}} = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi\nu \cdot L - \frac{1}{2\pi\nu \cdot C}\right)^2}}. \quad (1)$$

Падение напряжения на каждом участке цепи можно найти по закону Ома для данного участка, используя формулы ёмкостного $R_C = \frac{1}{\omega C}$ и индуктивного $R_L = \omega L$ сопротивлений:

$$U_{0C} = I_0 \cdot R_C = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭФФ}}}{2\pi\nu \cdot C}; \quad (2)$$

$$U_{0L} = I_0 \cdot R_L = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭФФ}} \cdot 2\pi\nu \cdot L; \quad (3)$$

$$U_{0R} = I_0 \cdot R. \quad (4)$$

Подставим численные значения в (1)-(4):

$$I_{\text{ЭФФ}} = \frac{220}{\sqrt{100^2 + \left(2\pi \cdot 50 \cdot 0.7 - \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 35.4 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} = 1.34 \text{ A};$$

$$U_{0C} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1.34}{2\pi \cdot 50 \cdot 35.4 \cdot 10^{-6}} = 170 \text{ В};$$

$$U_{0L} = \sqrt{2} \cdot 1.34 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0.7 = 417 \text{ В};$$

$$U_{0R} = 1.34 \cdot 100 = 134 \text{ В}.$$

Ответ: $I_{\text{ЭФФ}} = 1.34 \text{ A}$; $U_{0C} = 170 \text{ В}$; $U_{0L} = 417 \text{ В}$; $U_{0R} = 134 \text{ В}$.

Задача 23

В цепь переменного тока частотой 50 Гц включены катушка индуктивности, амперметр и ваттметр. Показания приборов соответственно 120 В, 10 А, 900 Вт. Определить индуктивность катушки, ее активное сопротивление и сдвиг фаз между током и напряжением.

Дано:
 $\nu = 50 \text{ Гц}$
 $U_{\text{ЭФФ}} = 120 \text{ В}$
 $I_{\text{ЭФФ}} = 10 \text{ А}$
 $P = 900 \text{ Вт}$

Найти:
 $L = ?$
 $R = ?$
 $\varphi = ?$

Решение

Цепь не содержит ёмкости, поэтому формула закона Ома для переменного тока $I_{\text{ЭФФ}} = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}$ не содержит

ёмкостного сопротивления:

$$I_{\text{ЭФФ}} = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{\sqrt{R^2 + (2\pi \cdot \nu \cdot L)^2}}. \quad (1)$$

Мощность переменного тока равна: $P = I_{\text{эфф}} \cdot U_{\text{эфф}} \cdot \cos \varphi$, откуда

$$\cos \varphi = \frac{P}{I_{\text{ЭФФ}} U_{\text{ЭФФ}}}. \quad (2)$$

Сдвиг фаз между током и напряжением определяется формулой:

$$tg\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{2\pi \cdot \nu \cdot L}{R}. \quad (3)$$

Преобразуем (3):

$$2\pi \cdot \nu \cdot L = R \cdot tg\varphi \quad (4)$$

и подставим в (1): $I_{\text{ЭФФ}} \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{\sqrt{R^2 + (R \cdot tg\varphi)^2}}$. Отсюда получим:

$$R^2(1 + tg^2\varphi) = \left(\frac{U_{\text{ЭФФ}}}{I_{\text{ЭФФ}}} \right)^2. \text{ Поскольку } (1 + tg^2\varphi) = \frac{1}{\cos^2\varphi}, \text{ то } \frac{R}{\cos\varphi} = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{I_{\text{ЭФФ}}}. \text{ С учётом}$$

$$(2) R = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{I_{\text{ЭФФ}}} \cdot \cos\varphi = \frac{U_{\text{ЭФФ}}}{I_{\text{ЭФФ}}} \cdot \frac{P}{I_{\text{ЭФФ}} U_{\text{ЭФФ}}}. \text{ Таким образом,}$$

$$R = \frac{P}{I_{\text{ЭФФ}}^2}. \quad (5)$$

Наконец, найдём индуктивность из (4):

$$L = \frac{R \cdot tg\varphi}{2\pi \cdot \nu}. \quad (6)$$

Подставим численные значения в (2), (5) и (6): $\cos\varphi = \frac{900}{10 \cdot 120} = 0.75$, откуда

$$\varphi = \arccos 0.75 = 42^\circ; R = \frac{900}{10^2} = 9 \text{ Ом}; L = \frac{9 \cdot tg 42^\circ}{2\pi \cdot 50} = 0.16 \text{ Гн}.$$

Ответ: $\varphi = 42^\circ$; $R = 9 \text{ Ом}$; $L = 0.16 \text{ Гн}$.

391. В цепи шел ток силой 50 А. Источник тока можно отключить от цепи, не разрывая ее. Определить силу тока в этой цепи через 0.01 с после отключения ее от источника тока. Сопротивление цепи равно 20 Ом, ее индуктивность 0.1 Гн.
392. Источник тока замкнули на катушку с сопротивлением 10 Ом и индуктивностью 1 Гн. Через сколько времени сила тока достигнет 0.9 предельного значения?
393. Цепь состоит из катушки индуктивностью 1 Гн и сопротивления 10 Ом. Источник тока можно отключить, не разрывая цепи. Определить время, по истечении которого сила тока уменьшится до 0.001 первоначального значения.
394. К источнику тока с внутренним сопротивлением 2 Ом подключают катушку индуктивностью 0.5 Гн и сопротивлением 8 Ом. Найти время, в течение которого ток в катушке, нарастая, достигнет значения, отличающегося от максимального на 1%.
395. Катушка имеет индуктивность 0.014 Гн и сопротивление 10 Ом. Через какое время после включения в катушке потечет ток, равный половине установившегося?

396. Определить силу тока в цепи через 0.01 с после размыкания. Сопротивление цепи 20 Ом и индуктивность 0.1 Гн. Сила тока до размыкания цепи 50 А.
397. По замкнутой цепи с сопротивлением 20 Ом течет ток. По истечении времени $8 \cdot 10^{-3}$ с после отключения источника без размыкания цепи сила тока в ней уменьшилась в 20 раз. Определить индуктивность цепи.
398. В электрической цепи, содержащей резистор с сопротивлением 20 Ом и катушку индуктивностью 0.06 Гн, течет ток силой 20 А. Определить силу тока в цепи через $0.2 \cdot 10^{-3}$ с после отключения источника без размыкания цепи.
399. Цепь состоит из катушки индуктивностью 0.1 Гн и источника тока. Источник тока отключили, не разрывая цепи. Время, по истечении которого сила тока уменьшилась до 0.001 первоначального значения, равно 0.07 с. Определить сопротивление катушки.
400. Источник тока замкнули на катушку сопротивлением 10 Ом и индуктивностью 0.2 Гн. Через сколько времени сила тока в цепи достигнет 50% максимального значения?
401. Источник тока замкнули на катушку сопротивлением 20 Ом. По истечении 0.1 с сила тока в катушке достигла 0.95 предельного значения. Определить индуктивность катушки.
402. В электрической цепи, состоящей из сопротивления 20 Ом и индуктивности 0.06 Гн, течет ток силой 20 А. Определить силу тока в цепи через 0.2 с после отключения источника без размыкания цепи.
403. Источник тока замкнули на катушку сопротивлением 20 Ом. По истечении времени 0.1 с сила тока замыкания достигла 0.95 предельного значения. Определить индуктивность катушки.
404. Катушка индуктивностью 1 мГн и воздушный конденсатор, состоящий из двух круглых пластин диаметром 20 см каждая, соединены параллельно. Расстояние между пластинами 1 см. Определить период колебаний.
405. Конденсатор электроемкостью $5 \cdot 10^{-10}$ Ф соединен параллельно с катушкой длиной 0.4 м и площадью сечения $5 \cdot 10^{-4}$ м². Катушка содержит 1000 витков. Сердечник немагнитный. Найти период колебаний.
406. Колебательный контур содержит конденсатор электроемкость $8 \cdot 10^{-12}$ Ф и катушку индуктивностью $0.5 \cdot 10^{-3}$ Гн. Каково максимальное напряжение на обкладках конденсатора, если максимальный ток $4 \cdot 10^{-2}$ А?
407. Катушка (без сердечника) длиной 0.50 м и площадью сечения $3 \cdot 10^{-4}$ м² имеет 1000 витков и соединена параллельно с конденсатором. Конденсатор состоит из двух пластин площадью $75 \cdot 10^{-4}$ м² каждая. Расстояние между пластинами 0.005 м. Диэлектрик - воздух. Определить период колебаний контура.
408. Колебательный контур состоит из воздушного конденсатора с площадью пластин 100 см² и катушки с индуктивностью 10 мкГн. Период колебаний в контуре 0.1 мкс. Определить расстояние между пластинами конденсатора.
409. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью 2.5 мкГн и двух конденсаторов, соединенных между собой параллельно, емкостью 0.005 мкФ каждый. Определить период колебаний в контуре и длину излучаемых контуром электромагнитных волн.

410. Определить частоту собственных колебаний колебательного контура, состоящего из конденсатора емкостью 2 мкФ и катушки длиной 10 см и радиусом 1 см. Катушка без сердечника, содержит 500 витков.
411. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 10 мкГн и конденсатора. Максимальный заряд конденсатора 2.5 мкКл, максимальная разность потенциалов на его обкладках 100 В. Определить длину волны, на которую будет резонировать контур.
412. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки индуктивности. Максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора 100 В. Максимальная сила тока в цепи 0.05 А. Определить емкость конденсатора и индуктивность катушки, если период колебаний 6.28 мс.
413. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 0.5 мкФ и катушки с индуктивностью 0.5 Гн. Конденсатору сообщили заряд 2.5 мкКл. Определить период колебаний, максимальные значения напряжения и силы тока в контуре.
414. Какова должна быть емкость конденсатора, чтобы с катушкой индуктивностью 25 мкГн обеспечить настройку на длину волны 100 м?
415. Колебательный контур, состоящий из воздушного конденсатора с пластинами, расположенными на расстоянии 3.6 мм друг от друга, и катушки с индуктивностью 1 мкГн, резонирует на волны длиной 10 м. Определить площадь пластин конденсатора.
416. Сила тока в колебательном контуре со временем изменяется по закону: $I = 0.02 \sin(400\pi t)$ (время – в секундах, сила тока – в амперах). Индуктивность контура 1 Гн. Найти: 1) период колебаний; 2) емкость конденсатора; 3) максимальную разность потенциалов на обкладках конденсатора.
417. Катушка без сердечника длиной 50 см и сечением 5 см² имеет 1000 витков и соединена параллельно с воздушным конденсатором. Конденсатор состоит из двух пластин площадью 75 см² каждая, расстояние между которыми 5 мм. Определить период колебаний контура.
418. Определить частоту собственных колебаний контура, состоящего из конденсатора емкостью 2 мкФ и катушки длиной 10 см и радиусом 1 см, имеющей 500 витков.
419. Три одинаково заряженных конденсатора емкостью 5 мкФ каждый соединяют в батарею и подключают к катушке, активное сопротивление которой 20 Ом и индуктивность 0.02 Гн. Во сколько раз будет отличаться частота затухающих колебаний, если конденсаторы один раз соединить параллельно, а второй – последовательно?
420. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 2 мкФ и катушки индуктивностью 0.1 Гн и сопротивлением 10 Ом. Определить логарифмический декремент затухающих колебаний.
421. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 2.66 нФ и катушки без сердечника, намотанной из медного провода диаметром 0.5 мм (витки вплотную, толщиной изоляции пренебречь). Длина катушки 20 см. Найти логарифмический декремент затухающих колебаний, считая $\beta \ll \omega_0$.

422. Батарея, состоящая из двух конденсаторов емкостью по 2 мкФ каждый, разряжается через катушку индуктивностью 1 мГн и сопротивлением 50 Ом. Возникнут ли при этом колебания, если конденсаторы соединены: а) параллельно; б) последовательно?
423. Какова относительная погрешность, которая будет сделана, если воспользоваться формулой $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ для вычисления периода колебаний контура, состоящего из конденсатора емкостью 5.5 нФ и катушки с обмоткой из медной проволоки сечением 0.2 мм²? Длина катушки 50 см. Диаметр катушки мал по сравнению с ее длиной.
424. Ток холостого хода в первичной обмотке трансформатора, питаемой от сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением 220 В, равен 0.2 А. Активное сопротивление первичной обмотки 100 Ом. Определить ее индуктивность.
425. Обмотка катушки сделана из медного провода площадью сечения 1 мм². При какой частоте переменного тока полное сопротивление этой катушки вдвое больше ее активного сопротивления? Диаметр катушки 5 см.
426. Цепь переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц состоит из активного сопротивления 10 Ом, емкости 50 мкФ и индуктивности 0.01 Гн, соединенных последовательно. Найти: 1) эффективную силу тока в цепи; 2) частоту, при которой в данном контуре наступит резонанс напряжений.
427. Конденсатор емкостью 1 мкФ и реостат с активным сопротивлением 3000 Ом включены последовательно в цепь переменного тока 220 В и частотой 50 Гц. Найти полное сопротивление цепи; падение напряжения на активном и емкостном сопротивлениях; сдвиг фаз между током и напряжением.
428. Мгновенное значение напряжения дано выражением: $U = 100\sin(800\pi t)$ (время – в секундах, напряжение – в вольтах). Найти амплитудное значение напряжения; эффективное напряжение; частоту; период колебаний. Записать выражение для мгновенного значения силы тока, если активное сопротивление контура 25 Ом, емкости и индуктивности нет.
429. В сеть с эффективным напряжением 220 В включены последовательно катушка с индуктивностью 0.16 Гн, активное сопротивление 2 Ом и конденсатор емкостью 64 мкФ. Определить эффективный ток в цепи, если частота его 200 Гц. При какой частоте наступит резонанс напряжений и каковы будут при этом амплитудные значения тока и напряжения на зажимах катушки и конденсатора?
430. Конденсатор и электрическая лампочка соединены последовательно и включены в цепь переменного тока с эффективным напряжением 440 В и частотой 50 Гц. Какую емкость должен иметь конденсатор для того, чтобы через лампочку протекал эффективный ток 0.5 А, а падение напряжения на лампочке было равно 110 В?
431. Два конденсатора емкостями 0.2 мкФ и 0.1 мкФ включены последовательно в цепь переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Найти силу тока в цепи; падение напряжения на каждом конденсаторе.
432. Катушка длиной 50 см и площадью поперечного сечения 10 см² включена в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Число витков катушки 3000. Найти

активное сопротивление катушки, если сдвиг фаз между током и напряжением равен 60° .

433. В цепь переменного тока с эффективным напряжением 30 В включены последовательно емкость 0.5 мкФ, активное сопротивление 20 Ом и индуктивность 1 мГн. При какой частоте наступит резонанс? Определить падение напряжения на каждом участке.
434. В цепь переменного тока частотой 50 Гц включены последовательно емкость 1 мкФ, активное сопротивление 100 Ом и индуктивность 1 Гн. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением на концах всей цепи? В какую сторону сдвинута фаза?
435. Цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц состоит из активного (10 Ом), емкостного (50 мкФ) и индуктивного (0.01 Гн) сопротивлений, включенных последовательно. Найти: 1) эффективный ток; 2) частоту переменного тока, при которой наступит резонанс напряжений.
436. В сеть переменного тока напряжением 110 В и частотой 100 Гц последовательно включены конденсатор емкостью 0.5 мкФ, катушка с индуктивностью 0.2 Гн и активное сопротивление 4 Ом. Найти: 1) силу тока в цепи; 2) резонансную частоту; 3) силу тока и напряжение на конденсаторе и катушке при резонансе напряжений.
437. Ртутно-кварцевая лампа ПРК-2 подключается к источнику переменного напряжения с частотой 50 Гц через дроссель, рабочее напряжение на котором 180 В, а эффективная сила тока 4 А. Найти активное сопротивление дросселя, если его индуктивность 0.1 Гн.
438. Определить действующее значение силы тока в цепи, состоящей из последовательно соединенных конденсатора емкостью 2 мкФ, катушки с индуктивностью 0.51 Гн и активным сопротивлением 100 Ом, если к цепи подводится переменное напряжение 220 В и частотой 50 Гц. Найти эффективное напряжение на отдельных участках цепи. При какой емкости конденсатора наступил бы резонанс напряжений?
439. В цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц включены последовательно конденсатор, активное сопротивление 100 Ом и катушка с индуктивностью 0.7 Гн. Определить емкость конденсатора, если эффективный ток в цепи 1.34 А. Найти емкость конденсатора, при которой возникнет резонанс напряжений, и силу тока в этом случае.
440. В цепь переменного тока частотой 50 Гц последовательно включены резистор 628 Ом и катушка индуктивности. При этом сдвиг фаз между током и напряжением равен $\pi/4$. Найти индуктивность катушки. Какую емкость нужно включить в цепь последовательно, чтобы сдвиг фаз стал равен нулю?
441. Какую энергию необходимо подвести к колебательному контуру с логарифмическим декрементом затухания 0.03, чтобы поддерживать в нем незатухающие колебания в течение 1 часа, если контур состоит из конденсатора емкостью 0.05 мкФ и катушки 2 мГн, а максимальный ток в катушке 5 мА?

442. Катушка с активным сопротивлением $10\ \Omega$ и индуктивностью включена в цепь переменного тока с напряжением $127\ \text{В}$ и частотой $50\ \text{Гц}$. Найти индуктивность катушки, если катушка поглощает мощность $400\ \text{Вт}$.
443. В цепь переменного тока с эффективным напряжением $220\ \text{В}$ подключены последовательно катушка индуктивностью $0.5\ \text{Гн}$ и активным сопротивлением $10\ \Omega$ и конденсатор емкостью $0.5\ \mu\text{Ф}$. Определить величину эффективного тока и эффективную мощность.
444. Конденсатор емкостью $5\ \mu\text{Ф}$ и активное сопротивление $150\ \Omega$ включены последовательно в цепь переменного тока с эффективным напряжением $120\ \text{В}$ и частотой $50\ \text{Гц}$. Найти максимальное и эффективное значения силы тока; сдвиг фаз между током и напряжением; эффективную мощность.
445. В цепь переменного тока частотой $50\ \text{Гц}$ включены катушка индуктивности, амперметр и ваттметр. Показания приборов соответственно $120\ \text{В}$, $10\ \text{А}$, $900\ \text{Вт}$. Определить индуктивность катушки, ее активное сопротивление и сдвиг фаз между током и напряжением.
446. Катушка индуктивностью $0.3\ \text{Гн}$ с активным сопротивлением $100\ \Omega$ включается в цепь переменного тока частотой $50\ \text{Гц}$ и эффективным напряжением $127\ \text{В}$. Определить амплитуду тока, сдвиг фаз между током и напряжением и выделяемую в цепи мощность.
447. Конденсатор емкостью $5\ \mu\text{Ф}$ и сопротивление $150\ \Omega$ включены последовательно в цепь переменного тока с эффективным напряжением $120\ \text{В}$ и частотой $50\ \text{Гц}$. Найти максимальное и эффективное значение силы тока, сдвиг фаз между током и напряжением, а также эффективную мощность.
448. В цепь переменного тока с эффективным напряжением $220\ \text{В}$ подключены последовательно катушка с индуктивностью $0.5\ \text{Гн}$ и активным сопротивлением $10\ \Omega$ и конденсатор емкостью $0.5\ \mu\text{Ф}$. Найти эффективный ток и эффективную мощность.
449. Определить эффективное значение силы тока, эффективную мощность и сдвиг фаз между током и напряжением, если сопротивление $150\ \Omega$ и конденсатор емкостью $5\ \mu\text{Ф}$ включены последовательно в цепь переменного тока с напряжением $120\ \text{В}$ и частотой $50\ \text{Гц}$.
450. Определить логарифмический декремент затухания контура, емкость которого $2.2\ \text{нФ}$ и индуктивность $150\ \mu\text{Гн}$, если на поддержание в этом контуре незатухающих колебаний с максимальным напряжением $0.9\ \text{В}$ требуется мощность $10\ \text{мВт}$.

Библиографический список

1. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С.Волькенштейн. – СПб.: Лань, 1999. – 328 с.
2. Иродов, И.Е. Задачи по общей физике: учебное пособие / И.Е.Иродов. – СПб.: Лань, 2001. – 416 с.
3. Савельев, И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике: учеб. пособие для студентов высш. техн. учеб. заведений / И.В.Савельев. – М.: АСТ, 2001. – 318 с.
4. Сахаров, Д.И. Сборник задач по физике для вузов / Д.И.Сахаров. – М.: Мир и Образование, 2003. – 400 с.
5. Чертов, А.Г. Задачник по физике: учеб. пособие / А.Г.Чертов, А.А. Воробьев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981. – 496 с.
6. Калашников, Н.П. Основы физики. Упражнения и задачи: учеб. пособие для вузов / Н.П.Калашников, М.А. Смондырев. – М.: Дрофа, 2004. – 464 с.
7. Калашников, Н.П. Основы физики: учеб. для вузов: в 2 т. / Н.П.Калашников, М.А.Смондырев. - 2-е изд., перераб. – М.: Дрофа, 2003.
8. Детлаф, А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, В.М. Яворский. - М.: Высш.шк., 1989.- 608 с.
9. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 3 т. Т. 2: Электричество / И. В. Савельев. - М.: Наука, 1977. - 431 с.
10. Курс физики: учеб. для вузов: в 2 т. Т. 1 / под ред. В.Н.Лозовского. – СПб.: Лань, 2000. – 576 с.
11. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова.-М.: Высш. шк., 1999.-542 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Требования к оформлению и общие методические указания.....	3
Раздел I. Электростатика и постоянный ток.....	3
1. Закон Кулона Напряженность поля. Теорема Гаусса	4
2. Энергия взаимодействия точечных зарядов. Работа в электростатическом поле. Потенциал.....	10
3. Поляризация диэлектриков. Проводники. Конденсаторы. Емкость. Энергия электростатического поля.....	15
4. Электрический ток. Законы Ома, Кирхгофа и Джоуля-Ленца.....	25
Раздел II. Электромагнетизм.....	35
5. Магнитное поле.....	35
6. Магнитное поле в веществе. Энергия магнитного поля.....	52
7. Индуктивность. Явление электромагнитной индукции.....	57
8. R-L –цепочка. Колебательный контур.....	69
Библиографический список.....	80