

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Костанайский государственный университет им. А.Байтурсынова
Кафедра электроэнергетики и физики

А.Ю. Валентова

МНОГОВАРИАНТНЫЕ ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ

МАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие

Костанай, 2019

УДК 537
ББК 22.3я73
В 15

Рецензенты:

Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и информационных технологий Костанайского социально – технического университета им. академика Зулкарнай Алдамжар

Поезжалов Владимир Михайлович, кандидат физико – математических наук, профессор КГУ, доцент кафедры электроэнергетики и физики.

Бенюх Олег Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры машин, тракторов и автомобилей КГУ им. А. Байтурсынова.

Автор:

Валентова Анна Юрьевна, старший преподаватель

В 15 Валентова А.Ю.

Многовариантные задачи по физике. Магнетизм. Учебно-методическое пособие для инженерных специальностей – Костанай, 2019. - 96 с.

ISBN 978-601-7597-16-0

В учебно-методическое пособие включены основные определения, понятия и законы магнетизма и типовые многовариантные задачи, а также примеры их решения. Пособие включает в себя следующие разделы магнетизма: магнитное поле, электромагнитная индукция, магнитное поле в веществе, переменный электрический ток, электромагнитные волны.

Предназначено для студентов технических и технологических специальностей.

УДК 537
ББК 22.3я73

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, ____20__ г , протокол № ____.

© Валентова А.Ю., 2019

Содержание

	Введение	4
1	Магнетизм	9
1.1	Магнитное поле постоянного тока	9
1.1.1	Основные теоретические понятия и формулы	9
1.1.2	Примеры решения многовариантных задач	14
1.1.3	Задачи для самостоятельного решения	22
1.2	Сила, действующая на проводник с током и движущийся заряд в магнитном поле.	24
1.2.1	Основные теоретические понятия и формулы	24
1.2.2	Примеры решения многовариантных задач	26
1.2.3	Задачи для самостоятельного решения	38
1.3	Закон полного тока. Магнитный поток. Магнитные цепи.	
1.3.1	Основные теоретические понятия и формулы	39
1.3.2	Примеры решения многовариантных задач	44
1.3.3	Задачи для самостоятельного решения	52
2.	Электромагнитная индукция. Энергия магнитного поля	54
2.1	Электромагнитная индукция. Индуктивность. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле.	54
2.1.1	Основные теоретические понятия и формулы	54
2.1.2	Примеры решения многовариантных задач	61
2.1.3	Задачи для самостоятельного решения	71
2.2	Энергия магнитного поля.	76
2.2.1	Основные теоретические понятия и формулы	76
2.2.2	Примеры решения многовариантных задач	81
2.2.3	Задачи для самостоятельного решения	87
	Заключение.....	88
3.	Приложения	89
4.	Список использованных источников.....	96

Введение

Изучение общей физики лишено всякого смысла без решения задач. Для хорошего усвоения теории очень важно практиковаться в решении стандартных задач. Данное пособие содержит примеры решения задач и многовариантные задачи для самостоятельного решения. Многовариантные задачи позволяют каждую задачу представить как набор из нескольких разных задач.

В этом пособии рассмотрим один из частных случаев электромагнитного поля - магнитное поле. В том числе изучим пять основных разделов: магнитное поле, электромагнитная индукция, магнитное поле в веществе, переменный ток, электромагнитные волны.

При изложении ряда вопросов этого раздела мы встретимся с некоторыми новыми понятиями: *поток* и *циркуляцией* векторной функции, а также с *градиентом* скалярной функции. Рассмотрим их последовательно.

Определим *элементарный поток* $d\Phi$ любого вектора $\vec{b}$ через бесконечно малую площадку da как *скалярное произведение* этого вектора на элемент поверхности или, иначе, на *вектор площадки*

$$d\vec{a} = da \cdot \vec{n} \quad (1)$$

где $\vec{n}$ — внешняя нормаль к площадке da .

Очевидно, что элемент поверхности $d\vec{a}$ направлен перпендикулярно поверхности в каждой ее точке. Руководствуясь определением потока, и обозначив его через Φ , можно записать

$$d\Phi = \vec{b} \cdot d\vec{a} = b \cdot da \cdot \cos\alpha, \quad (2)$$

где α — угол между вектором $\vec{b}$ и нормалью, проведенной к элементу поверхности (Рисунок 1),

$d\Phi$ — элементарный поток вектора $\vec{b}$.

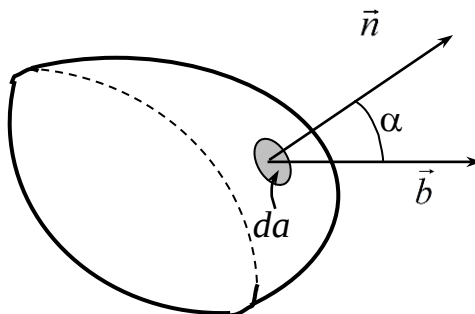


Рисунок 1

Название величины Φ — *поток* — взято из гидродинамики. Действительно, если $\vec{v}$ — скорость текущей жидкости, а a — площадь погруженной в нее плоской сетки, то объем жидкости, протекающей через сетку в единицу времени, будет равен

$$\Phi = v \cdot a \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

то есть Φ здесь — это поток вектора скорости.

На Рисунке 2 представлены три различные ориентации этой сетки. Очевидно, что последнее равенство (3) может быть получено интегрированием по всей поверхности a равенства (2), определяющего понятие элементарного потока, при условии, что величина вектора скорости и угол α постоянны по всей поверхности.

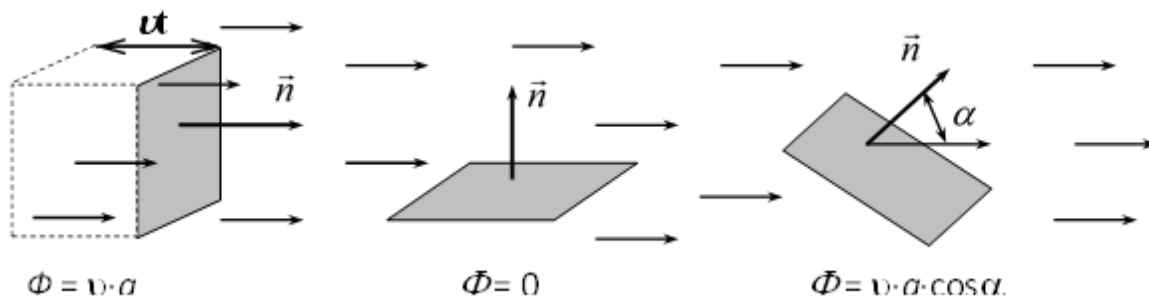


Рисунок 2

Естественно, что понятие потока применимо к любому множеству векторов, имеющих тот или иной физический смысл.

Понятие, к рассмотрению которого мы теперь переходим, несколько более сложно. Пусть имеется совокупность векторов $\vec{b}$, различной длины и направления, и задана некоторая кривая L , которую можно разбить на элементы $d\vec{l}$ (Рисунок 3).

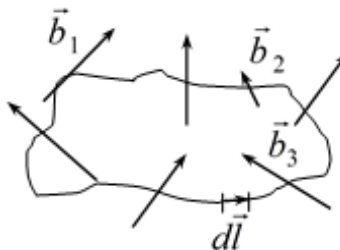


Рисунок 3

Требуется найти сумму скалярных произведений вектора $\vec{b}$ на соответствующий ему элемент перемещения $d\vec{l}$. Очевидно, что на каждом элементе $d\vec{l}$ вектор $\vec{b}$ имеет свое направление и величину. Если кривая L

замкнута, интегрирование ведется по замкнутому контуру, что обозначается кружком у знака интеграла, а интеграл от вектора $\vec{b}$ носит название *циркуляции $\vec{b}$ вдоль контура L* :

$$\oint \vec{b} d\vec{l} = \oint b dl \cos \alpha = \oint b_l d\vec{l} \quad (4)$$

где b_l есть проекция вектора на соответствующий элемент контура.

Положим теперь, что контур L есть плоский прямоугольник (Рисунок 4), имеющий стороны Δx и Δy .

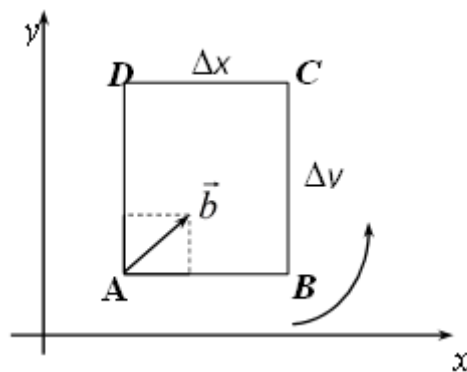


Рисунок 4

Выбрав обозначенное стрелкой направление обхода, начатого из точки A , получим возможность представить означенный выше интеграл суммой четырех произведений, взятых последовательно по каждой из сторон:

$$\oint b_l dl = b_{x_1} \Delta x + b_{y_1} \Delta y - b_{x_2} \Delta x - b_{y_2} \Delta y \quad (5)$$

где b_{x_1} , b_{x_2} , b_{y_1} , b_{y_2} — значения проекций вектора $\vec{b}$ на соответствующие стороны прямоугольника.

Отрицательный знак появляется потому, что обход по контуру дважды совпадает с убывью координаты. Условимся выбирать прямоугольник столь малым, чтобы на его сторонах Δx и Δy соответствующие проекции вектора $\vec{b}$ можно было бы считать постоянными. Последнее означает, что при обходе, например, по стороне Δy проекция b_y сохраняет свое значение, но проекция b_x будет меняться. При обходе по Δx , естественно, меняться будет проекция b_y .

Изменение проекции b_y на единицу пути по оси x составит $\frac{\partial b_y}{\partial x}$, а изменение b_x

на единицу пути по оси y — $\frac{\partial b_x}{\partial y}$. Значения b_y , например, на отрезках AD и BC

будут отличаться друг от друга на величину $\frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta x$. Следовательно

$$b_{y_1} = b_{y_2} + \frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta x; \quad b_{x_2} = b_{x_1} + \frac{\partial b_x}{\partial y} \Delta y. \quad (6)$$

Тогда

$$\oint b_l dl = b_{x_1} \Delta x + (b_{y_2} + \frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta x) \Delta y - (b_{x_1} + \frac{\partial b_x}{\partial y} \Delta y) \Delta x - b_{y_2} \Delta y. \quad (7)$$

Раскрывая скобки и заменяя произведение $\Delta x \Delta y$ через ΔS , получим:

$$\oint b_l dl = \frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta S - \frac{\partial b_x}{\partial y} \Delta S. \quad (8)$$

Полученное выражение есть *циркуляция* вектора $\vec{b}$ в двумерном случае.

Коснемся теперь еще одного понятия — *градиента*. Пусть имеется скалярное поле φ , то есть заданные в каждой точке значения некоторой скалярной величины φ . Выделим в нем совокупность точек, где значения функции φ одинаковы (Рисунок 5) и равны какому-либо значению φ_0 .

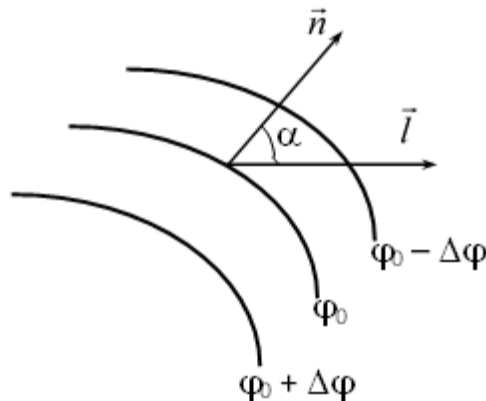


Рисунок 5

Эта совокупность образует поверхность, называемую *поверхностью уровня*. Рядом расположены поверхности с большими и меньшими значениями этой же скалярной величины. Выберем произвольное направление $\vec{l}$.

Производная $\frac{d\varphi}{dl}$ будет характеризовать изменение функции φ на единицу длины в направлении $\vec{l}$. Теперь проведем к поверхности φ_0 нормаль $\vec{n}$.

Производная $\frac{d\varphi}{dn}$ будет также характеризовать изменение этой же функции φ на единицу длины, но уже в направлении $\vec{n}$. Естественно, значения производных не будут одинаковы: производная по n больше производной по l .

Вектор, численно равный $\frac{d\varphi}{dn}$ и направленный по нормали к поверхности уровня, называют *градиентом* скалярной функции φ :

$$\mathbf{grad} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \vec{n}. \quad (9)$$

Очевидно, что производная от φ по направлению l равна проекции вектора градиента на это направление, так как $\partial n = \partial l \cos \alpha$ (см. Рисунок 5). Отсюда можно заключить, что в направлении вектора градиента значение функции φ меняется наиболее быстро: при положительном значении градиента — возрастает, при отрицательном — уменьшается.

В декартовых координатах градиент можно представить как векторную сумму его проекций на оси координат:

$$\mathbf{grad} \varphi = \vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (10)$$

1. Магнитное поле

1.1 Основные теоретические понятия и формулы

В пространстве, окружающем электрические токи и постоянные магниты возникает силовое поле, которое называется **магнитным**.

Экспериментально установлено, что:

- 1) магнитное поле действует на движущиеся заряды,
- 2) движущиеся заряды создают магнитное поле.

За **положительное направление нормали** по отношению рамки с током принимается **направление поступательного движения правого винта**, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке.

За **направление магнитного поля** в данной точке принимается **направление**, вдоль которого располагается положительная нормаль к свободно подвешенной рамке с током или направление, совпадающее с направлением силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки, помещённой в данную точку поля. (см. рисунок 1)

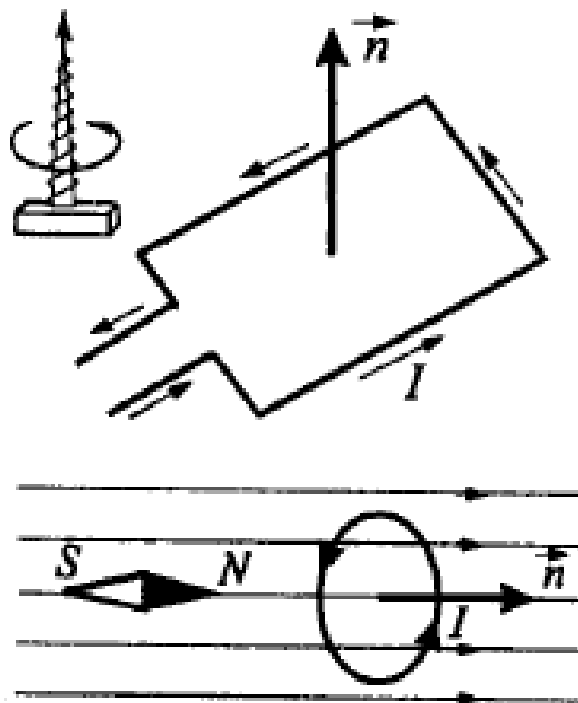


Рисунок 1 Направление магнитного поля.

Магнитная индукция $\vec{B}$ - силовая характеристика магнитного поля, определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с

магнитным моментом, равным единице, когда нормаль в рамке перпендикулярна полю.

Единица измерения магнитной индукции – Тл (тесла)

Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с током.

Механический момент действующий на контур с током, помещённый в однородное магнитное поле:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}] \quad (11)$$

где $\vec{B}$ - магнитная индукция,
 $\vec{p}_m$ - магнитный момент контура с током.

Магнитный момент контура с током:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} \quad (12)$$

где S - площадь контура с током,
 $\vec{n}$ - единичный вектор нормали к поверхности контура,
 I - сила тока в контуре.

Макроскопические токи – токи, протекающие по проводникам в электрических цепях.

Микроскопические токи – обусловлены движением электронов в атомах и молекулах.

Магнитное поле **макотока** описывается **вектором напряжённости магнитного поля $\vec{H}$** .

Единица измерения напряжённости магнитного поля А/м (ампер на метр)

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ характеризует поле, созданное всеми макро и микро токами.

Связь магнитной индукции $\vec{B}$ и напряжённости магнитного поля $\vec{H}$:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{B} \quad (13)$$

где μ_0 - магнитная постоянная,
 μ - магнитная проницаемость среды.

Магнитная постоянная:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \quad (14)$$

Закон Био-Савара-Лапласа:

Элемент проводника $\vec{dl}$ с током I создаёт в некоторой точке A индукцию поля (см. рисунок 2)

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \cdot \frac{I[\vec{dl}, \vec{r}]}{r^3} \quad (15)$$

где $\vec{dB}$ - магнитная индукция поля, создаваемая элементом длины $\vec{dl}$ проводника с током I ,

$\vec{r}$ - радиус – вектор, проведённый от $\vec{dl}$ к точке, в которой определяется магнитная индукция.

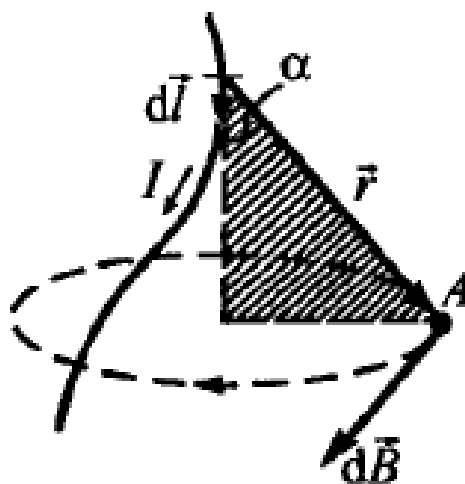


Рисунок 2. Магнитное поле, создаваемое элементом проводника с током.

Модуль вектора $\vec{dB}$:

$$dB = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^3} \quad (16)$$

где α - угол между векторами $\vec{dl}$ и $\vec{r}$

Принцип суперпозиции (наложения) магнитных полей:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i \quad (17)$$

где $\vec{B}$ - магнитная индукция результирующего поля,
 $\vec{B}_i$ - магнитная индукция складываемых полей.

Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током I (см. Рисунок 3)

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R} \quad (18)$$

где R - расстояние от оси проводника.

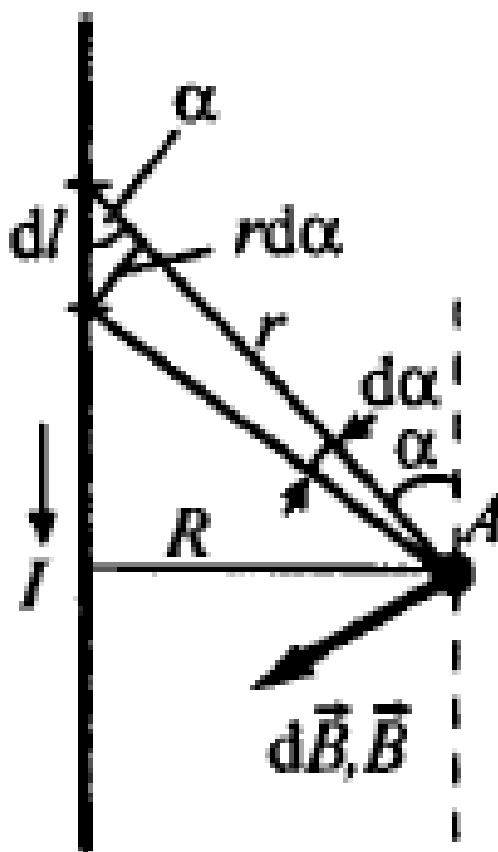


Рисунок 3 Магнитное поле прямого тока текущего по проводу бесконечной длины

Если ток течёт по отрезку провода (см. Рисунок 4), то **магнитное поле, создаваемое отрезком провода:**

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (19)$$

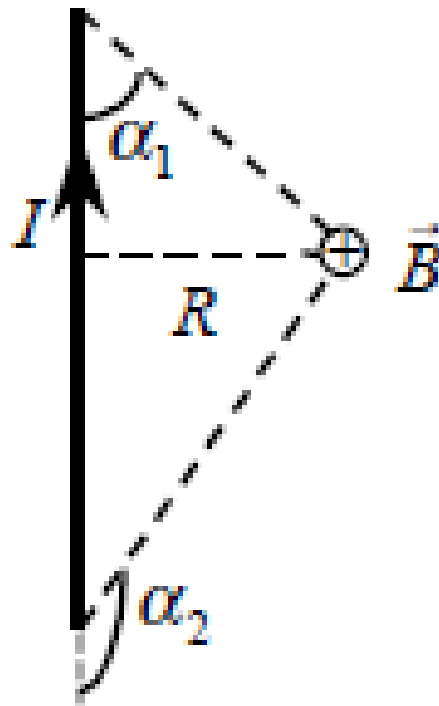


Рисунок 4. Магнитное поле, создаваемое отрезком прямого провода.

Магнитная индукция в центре кругового проводника с током (см. Рисунок 5):

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R} \quad (20)$$

где R - радиус кривизны проводника.

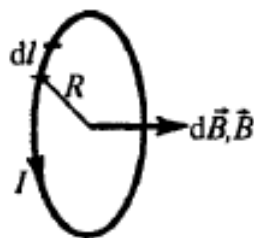


Рисунок 5. Магнитное поле в центре кругового тока.

Магнитное поле на расстоянии r от центра витка вдоль оси витка:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2} \cdot \frac{IR^2}{\left(\sqrt{R^2 + r^2}\right)^3} \quad (21)$$

Напряжённость магнитного поля создаваемого круговым током на большом расстоянии от витка с током ($r \gg R$):

$$H = \frac{2IS}{4\pi r^3} = \frac{2p_m}{4\pi r^3} \quad (22)$$

где $p_m = IS$ - магнитный момент витка с током.

Закон Ампера:

Сила $d\vec{F}$ с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{l}$ с током, находящегося в магнитном поле, равна:

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}] \quad (23)$$

где $d\vec{l}$ - вектор, по модулю равный dl и совпадающий по направлению с током,

$\vec{B}$ - вектор магнитной индукции.

Правило левой руки (определяющее направление силы Ампера):

Если ладонь левой руки расположить так, чтобы в неё входил вектор $\vec{B}$, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец покажет направление силы Ампера (см. Рисунок 6)

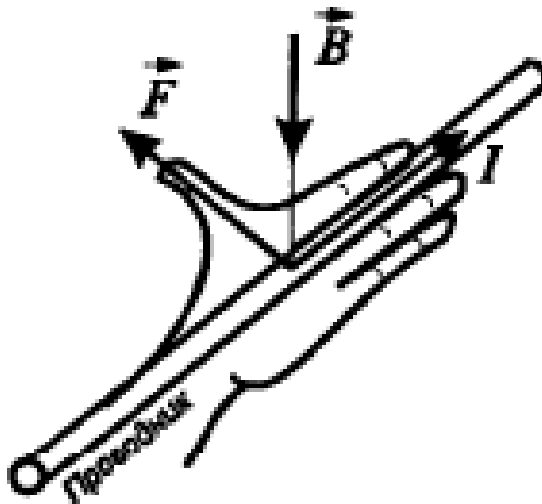


Рисунок 6. Правило левой руки (направление силы Ампера)

Взаимодействие параллельных токов:

$$dF_1 = dF_2 = dF = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{R} dl \quad (24)$$

причём проводники с током одинакового направления притягиваются, а проводники с током разного направления отталкиваются (см. Рисунок 7).

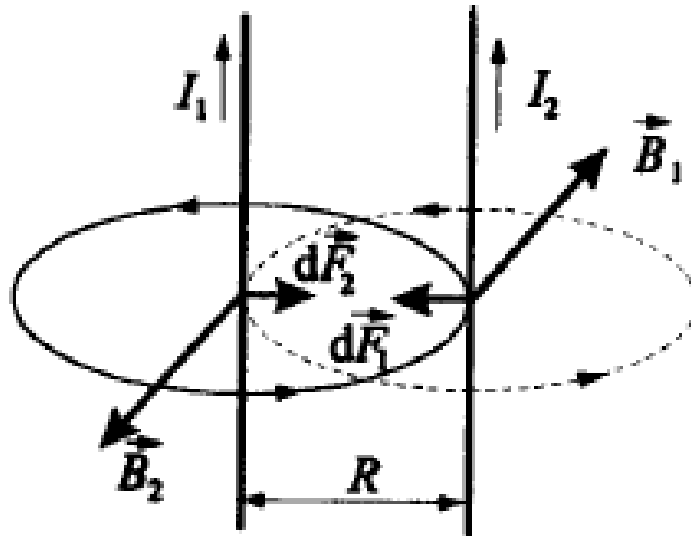


Рисунок 7. Взаимодействие параллельных токов.

Проводник с током создаёт вокруг себя магнитное поле. Электрический ток – это упорядоченное движение электрических зарядов. Поэтому свободно движущийся с нерелятивистской скоростью точечный электрический заряд создаёт магнитное поле:

Магнитное поле свободно движущегося заряда:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot [\vec{v}, \vec{r}]}{r^3} \quad (25)$$

модуль:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{qv}{r^2} \cdot \sin \alpha \quad (26)$$

где

$\vec{r}$ – радиус вектор, проведённый из заряда q к точке наблюдения
 α – угол между $\vec{v}$ и $\vec{r}$

Сила Лоренца:

сила, действующая на электрический заряд q , движущийся в магнитном поле $\vec{B}$ со скоростью $\vec{v}$, называется силой Лоренца:

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}] \quad (27)$$

модуль силы Лоренца:

$$F = qvB \sin \alpha \quad (28)$$

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки, так же как и сила Ампера.(см. рисунок 8)

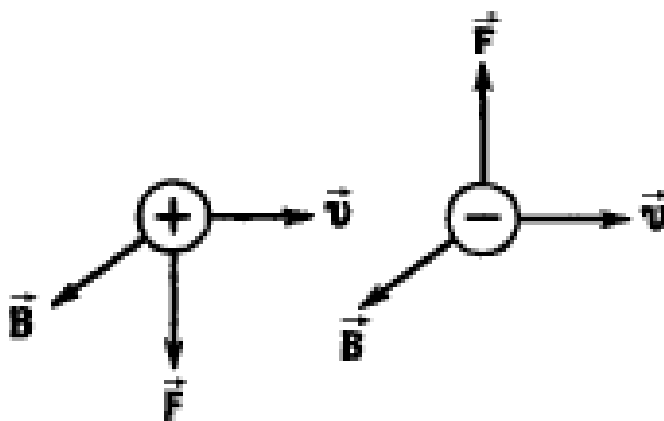


Рисунок 8. Направление силы Лоренца.

Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения частицы.

Важно: за положительное направление электрического тока принимают направление движения положительных электрических зарядов.

Постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в нём заряженной частицей и кинетическая энергия этой частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Формула Лоренца

(описывает движение электрического заряда, на который кроме магнитного поля с индукцией $\vec{B}$ действует и электрическое поле с напряжённостью $\vec{E}$):

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}] \quad (29)$$

Движение заряженных частиц в магнитном поле:

- $\vec{v} \parallel \vec{B}$ - заряженная частица движется в магнитном поле вдоль линий магнитной индукции. Сила Лоренца равна нулю. Частица движется прямолинейно и равномерно.

- $\vec{v} \perp \vec{B}$ - заряженная частица движется в магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции.

Сила Лоренца $F = qvB$: постоянна по модулю и нормальна к траектории частицы.

Частица будет двигаться по окружности радиуса R с центростремительным ускорением $a_n = \frac{v^2}{R}$, откуда следует, что радиус окружности:

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (30)$$

период вращения

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (31)$$

Примечание: отношение $\frac{q}{m}$ называется удельным зарядом

- заряженная частица движется под углом α к линиям магнитной индукции.

Движение частицы представляют в виде суммы двух движений:

- 1) равномерного прямолинейного движения вдоль поля со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$
- 2) равномерного движения по окружности в плоскости перпендикулярной полю.

Суммарное движение будет движением по спирали, ось которой параллельна магнитному полю. (см. Рисунок 9)

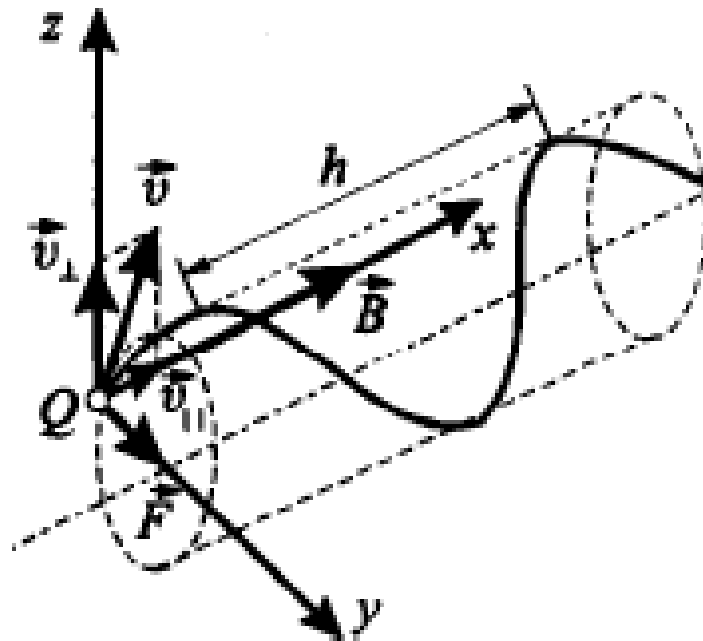


Рисунок 9. Движение заряженной частицы под углом α к линиям магнитной индукции.

Шаг винтовой линии:

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB} \quad (32)$$

Эффект Холла –

это возникновение электрического тока в проводнике или полупроводнике с током при помещении его в магнитное поле (следствие влияния силы Лоренца на движение носителей тока) (см. Рисунок 10)

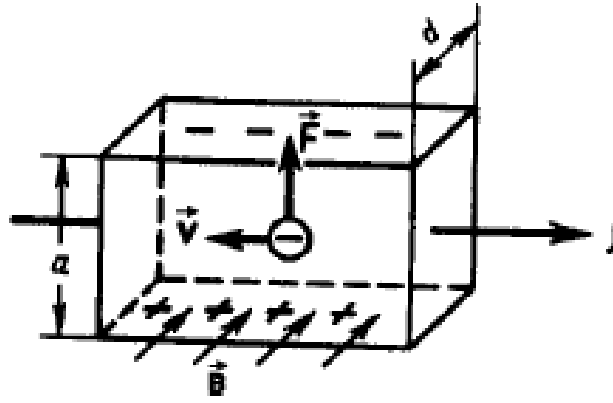


Рисунок 10. Эффект Холла

В магнитном поле $\vec{B}$ при протекании через проводник тока с плотностью $\vec{j}$ устанавливается электрическое поле с напряжённостью:

$$\vec{E} = R[\vec{B}, \vec{j}] \quad (33)$$

где R - постоянная Холла

Поперечная (холловская) разность потенциалов:

$$\Delta\varphi = vBa \quad (34)$$

где a – ширина пластинки.

$$\Delta\varphi = \frac{1}{en} \cdot \frac{IB}{d} = R \frac{IB}{d} \quad (35)$$

где $R = \frac{1}{en}$ - постоянная Холла,

n - концентрация электронов,

e - заряд электрона,

v - средняя скорость упорядоченного движения электронов.

Циркуляцией вектора $\vec{B}$ по заданному замкнутому контуру называется интеграл по этому контуру (см. рисунок 11):

$$\oint_L \vec{B}_l d\vec{l} = \oint_L B_l dl \quad (36)$$

где $\vec{dl}$ - элемент длины контура, направленный вдоль обхода контура
 $B_l = B \cos \alpha$, - составляющая вектора $\vec{B}$ в направлении касательной к контуру, с учётом выбранного направления обхода,
 α - угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{dl}$.

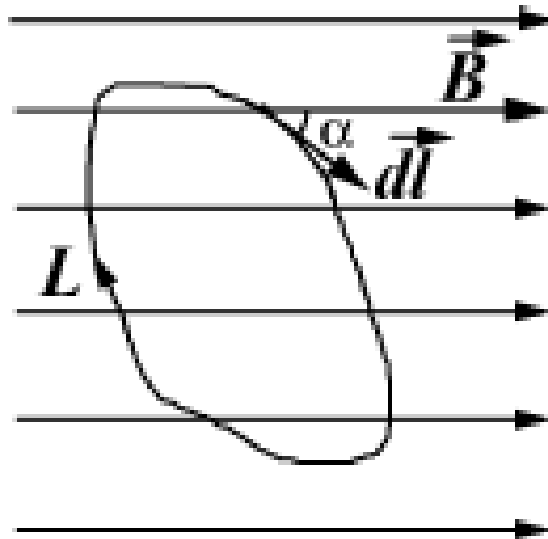


Рисунок 11 Циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру.

Теорема о циркуляции вектора $\vec{B}$ (закон полного тока для магнитного поля в вакууме):

циркуляция вектора $\vec{B}$ по произвольному замкнутому контуру равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k \quad (37)$$

где n - число проводников с током, охватываемых контуром L произвольной формы. (примечание: эта теорема справедлива только для поля в вакууме, положительным считается ток, направление которого связано с направлением обхода правилом правого винта.)

Соленоидом называется свёрнутый в спираль изолированный проводник по которому течёт электрический ток (см.Рисунок 12)

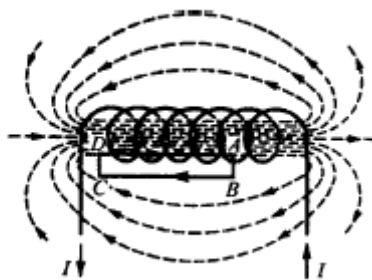


Рисунок 12 Магнитное поле соленоида

Магнитная индукция бесконечного соленоида в вакууме:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (38)$$

где N - число витков в соленоиде,
 I - сила тока, текущего в соленоиде,
 l - длина соленоида.

Тороид — кольцевая катушка с витками, намотанными на сердечник, имеющий форму тора, по которой течёт ток. (см. Рисунок 13)

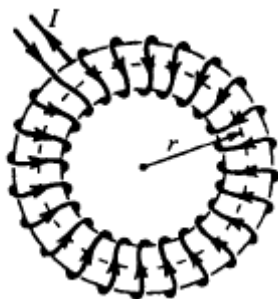


Рисунок 13 Тороид

Магнитное поле тороида в вакууме:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad (39)$$

где r - радиус окружности, центр которой расположен на оси тороида,
 N - число витков тороида.

Потоком вектора магнитной индукции (магнитным потоком) через площадку dS называется скалярная физическая величина, равная

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS \quad (40)$$

где $B_n = B \cos \alpha$, проекция вектора $\vec{B}$ на направление нормали $\vec{n}$ к площадке dS ,

α - угол между векторами $\vec{n}$ и $\vec{B}$,

$d\vec{S}$ - вектор, модуль которого равен dS , а направление совпадает с направлением нормали $\vec{n}$ к площадке.

Магнитный поток создаваемый контуром с током через поверхность, ограниченную им самим, всегда положителен.

Поток вектора магнитной индукции через произвольную поверхность S :

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = B_n dS \quad (41)$$

Если поле однородно и перпендикулярно ему расположена плоская поверхность с площадью S , то

$$\Phi_B = BS. \quad (42)$$

Единица измерения магнитного потока – вебер (Вб)

Теорема Гаусса для магнитного поля в вакууме:

поток вектора магнитной индукции сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (43)$$

(физический смысл – магнитных зарядов не существует, поэтому линии магнитной индукции не имеют ни начала ни конца и являются замкнутыми).

Магнитный поток через поверхность, ограниченную замкнутым контуром называется потокосцеплением Ψ этого контура.

Потокосцепление контура, обусловленное магнитным полем тока в самом этом контуре называется потокосцеплением самоиндукции.

Магнитный проток сквозь один виток соленоида площадью S :

$$\Phi_1 = BS \quad (45)$$

Полный магнитный поток, сцеплённый со всеми витками соленоида равен:

$$\Psi = B_1 S = BSN = \frac{\mu\mu_0 NI}{l} SN = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S \quad (46)$$

Потокосцепление контура, обусловленное магнитным полем тока, идущего в другом контуре называется потокосцеплением этих двух контуров.

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на магнитный поток, пересечённый движущимся проводником. (см Рисунок 14)

$$dA = Id\Phi \quad (47)$$

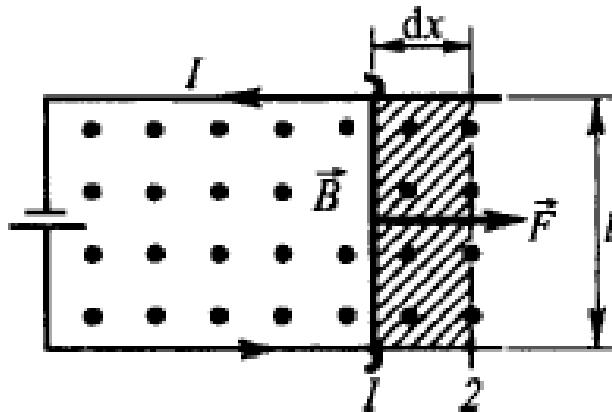


Рисунок 14. Перемещение проводника с током в магнитном поле

Работа по перемещению контура с током в магнитном поле:

работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле равна произведению силы тока в контуре на изменение магнитного потока, сцепленного с контуром (или на его потокосцепление) (см. Рисунок 15)

$$dA = I(d\Phi_2 - d\Phi_1) \quad (48)$$

или

$$A = I(\Psi_2 - \Psi_1) \quad (49)$$

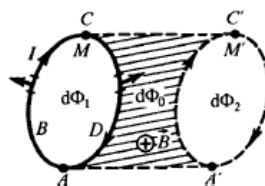


Рисунок 15 Работа по перемещению контура с током в магнитном поле

1.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 1

Магнитная индукция в центре тонкого кольца, по которому идёт ток I равна B . Радиус кольца равен R .

Магнитная проницаемость среды равна μ .

Напряжённость магнитного поля в центре тонкого кольца равна H .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 1):

Таблица 1.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I, A	12	13	14	15	20	25	10	11	5	7
$R, \text{см}$	3	4	5	6	7	2	4	7	5	9
$B, \text{Тл}$										
μ	2									
$H, A/m$										

Пример решения 1 варианта

Дано:

$$I = 12A$$

$$R = 3\text{см} = 3 \cdot 10^{-2}\text{м.}$$

$$\mu = 2$$

Найти:

$$B - ?$$

$$H - ?$$

Решение:

Определим напряжённость магнитного поля в центре витка с током по формуле:

$$H = \frac{I}{2R}$$

Подставим численные значения и получим:

$$H = \frac{12}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-2}} = 200(\text{А/м})$$

Определим индукцию магнитного поля в центре тонкого кольца:

$$B = \mu\mu_0 H$$

Подставим численные значения и получим:

$$B = \mu\mu_0 H = 2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 200 = 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,5(\text{мТл.})$$

Ответ:

$$B = 0,5(\text{мТл.})$$

$$H = 200(\text{А/м})$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

Задача 2

По двум бесконечно длинным параллельным проводам, которые находятся на расстоянии R друг от друга текут одинаковые по величине токи I .

Магнитная индукция и напряжённость магнитного поля создаваемые первым проводником в точке, которая удалена от первого проводника на расстояние R_1 равны соответственно B_1 и H_1 .

Магнитная индукция и напряжённость магнитного поля создаваемые вторым проводником в точке, которая удалена от второго проводника на расстояние R_2 равны соответственно B_2 и H_2 .

Магнитная индукция в точке наблюдения равна B . Напряжённость магнитного поля в точке наблюдения равна H .

Расстояние между проводниками равно $R = R_1 + R_2$.

Среда – вакуум для случаев, когда

- а) токи в проводниках текут в одном направлении,
- б) токи в проводниках текут в разных направлениях.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 2):

Таблица 2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I, А	12	10	8	9	5	7	6	4	3	2
R, см	5	10	8	7	9	4	12	14	16	11
R ₁ , см	1	4	6	2	1	3	5	5	6	2
R ₂ , см	4	6	2	5	8	1	7	9	10	9
B ₁ , мТл	*									
H ₁ , А/м	*									
B ₂ , мТл	*									
H ₂ , А/м	*									
B, мТл.	*									
H, А/м	*									

Пример решения 1 варианта**Дано:**

$$I = 12 \text{ А}$$

$$R = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$R_1 = 1 \text{ см.} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$R_2 = 4 \text{ см.} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Найти:

$$B_1 - ?$$

$$H_1 - ?$$

$$B_2 - ?$$

$$H_2 - ?$$

$$H - ?$$

$$B - ?$$

Решение.

а) токи в проводниках текут в одном направлении,

Рассмотрим случай, когда токи в проводниках текут в одну сторону. Согласно правилу правой руки вектор магнитной индукции, создаваемый первым проводником (левым) в точке наблюдения, лежащей между двумя проводниками будет направлен за плоскость (входить туда перпендикулярно) в которой лежат проводники, а вектор магнитной индукции, создаваемый вторым

(правым) проводником будет напротив направлен из плоскости в которой лежат проводники (выходить оттуда перпендикулярно плоскости).

Следовательно, результирующая магнитная индукция, создаваемая двумя проводниками, для случая, когда токи в проводниках текут в одну сторону будет равна алгебраической разности магнитных индукций, создаваемых каждым из проводников в отдельности и направлена в сторону большей из них

Магнитная индукция магнитного поля, создаваемого бесконечным проводником с током рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R}$$

Рассчитаем модуль индукции магнитного поля, создаваемую первым проводником

$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R_1} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{4 \cdot 3,14} \cdot \frac{2 \cdot 12}{1 \cdot 10^{-2}} = 2,4 \cdot 10^{-6} = 2,4(\text{мкТл})$$

Напряжённость магнитного поля, создаваемого бесконечным проводником с током

$$H = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R}$$

Рассчитаем напряжённость магнитного поля, создаваемого первым проводником:

$$H_1 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R_1} = \frac{1}{4 \cdot 3,14} \cdot \frac{2 \cdot 12}{1 \cdot 10^{-2}} = 191 (\text{А/м})$$

Рассчитаем модуль индукции магнитного поля, создаваемого вторым проводником

$$B_2 = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R_2} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{4 \cdot 3,14} \cdot \frac{2 \cdot 12}{4 \cdot 10^{-2}} = 2,4 \cdot 10^{-6} = 0,6(\text{мкТл})$$

Рассчитаем напряжённость магнитного поля, создаваемого вторым проводником:

$$H_2 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R_2} = \frac{1}{4 \cdot 3,14} \cdot \frac{2 \cdot 12}{4 \cdot 10^{-2}} = 48 (\text{А/м})$$

Определим модуль результирующего значения индукции магнитного поля, создаваемого двумя бесконечными проводниками, с одинаковым

направлением токов в точке наблюдения, лежащей между этими проводниками. Как было показано выше, он равен разности модулей индукций магнитного поля, создаваемых каждым из проводников в отдельности, поскольку в точке наблюдения вектора $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ направлены противоположно друг другу:

$$B = B_1 - B_2$$

Подставим численные значения и получим:

$$B = B_1 - B_2 = 2,4 \cdot 10^{-6} - 0,6 \cdot 10^{-6} = 1,8 \cdot 10^{-6} = 1,8(\text{мкТл})$$

Таким же образом высчитаем модуль результирующей напряжённости магнитного поля в точке наблюдения:

$$H = H_1 - H_2$$

Подставим численные значения и получим:

$$H = 191 - 48 = 143(\text{А/м})$$

б) токи в проводниках текут в разных направлениях.

Рассмотрим случай, когда токи в проводниках текут в разные стороны. Согласно правилу правой руки вектор магнитной индукции, создаваемый первым проводником (левым) в точке наблюдения, лежащей между двумя проводниками будет направлен за плоскость(входит туда перпендикулярно) в которой лежат проводники, а вектор магнитной индукции, создаваемый вторым (правым) проводником будет направлен в том же направлении что и вектор магнитной индукции, создаваемый первым проводником.

Следовательно, результирующая магнитная индукция, создаваемая двумя проводниками, для случая, когда токи в проводниках текут в разные стороны будет равна алгебраической сумме магнитных индукций, создаваемых каждым из проводников в отдельности.

Воспользуемся тем, что магнитная индукция и напряжённость магнитного поля, создаваемая каждым из проводников были вычислены в предыдущей части задачи найдём результирующее значение индукции магнитного поля:

$$B = B_1 + B_2$$

Подставим численные значения и получим:

$$B = B_1 + B_2 = 2,4 \cdot 10^{-6} + 0,6 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-6} = 3(\text{мкТл})$$

Аналогично, для результирующей напряжённости магнитного поля в точке наблюдения получим:

$$H = H_1 + H_2$$

Подставим численные значения и получим:

$$H = 191 + 48 = 239(\text{А/м})$$

Ответ:

а) токи в проводниках текут в одном направлении,

$$B_1 = 2,4(\text{мкТл})$$

$$H_1 = 191 (\text{А/м})$$

$$B_2 = 0,6(\text{мкТл})$$

$$H_2 = 48 (\text{А/м})$$

$$B = 1,8(\text{мкТл})$$

$$H = 143(\text{А/м})$$

б) токи в проводниках текут в разных направлениях.

$$B_1 = 2,4(\text{мкТл})$$

$$H_1 = 191 (\text{А/м})$$

$$B_2 = 0,6(\text{мкТл})$$

$$H_2 = 48 (\text{А/м})$$

$$B = 3(\text{мкТл})$$

$$H = 239(\text{А/м})$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

1.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 3.

Электрон, ускоренный разностью потенциалов U , приобретает скорость равную v и влетает в однородное магнитное поле с магнитной индукцией B перпендикулярно линиям магнитной индукции.

На электрон в магнитном поле действует сила Лоренца F .

Электрон движется в магнитном поле по окружности с радиусом R с центростремительным ускорением a_n .

Период вращения по окружности составляет T .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 3):

Таблица 3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U , кВ	1,2	1,3	1,4	1,5	2,0	2,5	1,0	1,1	0,5	0,7
B , мТл.	3	4	5	6	7	2	4	7	5	9
v , м/с	*									
F , Н	*									
R , см	*									
a_n , м/с	*									
T , мс	*									

Задача 5

Электрон, обладая скоростью v , влетает в однородное магнитное поле под углом α к направлению поля и начинает двигаться по спирали.

Напряжённость магнитного поля равна H .

Шаг спирали равен h .

Радиус спирали равен R .

Период вращения электрона равен T .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 4):

Таблица 4.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v , Мм/с	1,2	1,3	1,4	1,5	2,0	2,5	1,0	1,1	0,5	0,7
H , кА/м.	1,5	2,5	0,5	0,7	0,8	1,2	1,4	1,7	1,5	0,9
α , °	60									
h , см.	*									
R , см.	*									
T , мс	*									

Задача 5

Прямой провод, по которому течёт ток I , расположен в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Магнитное поле действует на отрезок провода длиной l с силой ампера равной F . Магнитная индукция поля равна B .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 5):

Таблица 5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I , кА	1,2	1,0	0,8	0,9	0,5	0,7	1,6	1,4	1,3	1,2
l , см	55	70	85	75	90	40	12	64	56	76
B , Тл.	1	4	6	2	1	3	5	5	6	2
F , Н	*									

Задача 6

Соленоид сечением S имеет n витков на каждый сантиметр длины. Сила тока, текущего по нему равна I . Магнитный поток, создаваемый соленоидом равен Φ .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 6):

Таблица 6

Вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I , А	20	1,0	0,8	0,9	0,5	0,7	1,6	1,4	1,3	1,2
S , см ²	10	70	85	75	90	40	12	64	56	76
Φ , Вб	*	4	6	2	1	3	5	5	6	2
n	10									

2. Электромагнитная индукция

2.1 Основные теоретические понятия и формулы

Явление электромагнитной индукции заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название индукционного.

Основные свойства индукционного тока:

- индукционный ток возникает всегда, когда происходит изменение сцеплённого с контуром потока магнитной индукции.
- сила индукционного тока не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется лишь скоростью его изменения. .

Закон Фарадея:

ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\Theta_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (50)$$

или (в электротехнике) закон Фарадея записывают в форме:

$$\Theta_i = - \frac{d\psi}{dt} \quad (51)$$

Правило Ленца:

при всяком изменении магнитного потока сквозь замкнутую поверхность, натянутую на замкнутый проводящий контур в последнем возникает индукционный ток, такого направления, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока.

В неподвижных проводниках переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, циркуляция вектора напряжённости по любому контуру L проводника представляет собой ЭДС электромагнитной индукции (см. рисунок 16):

$$\Theta_i = \int_L \vec{E}_B \overrightarrow{dl} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (52)$$

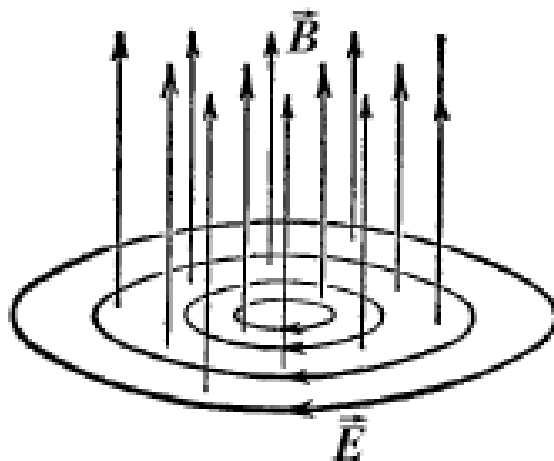


Рисунок 16. Электромагнитная индукция в неподвижных проводниках

Явление электромагнитной индукции применяется для преобразования механической энергии в энергию электрического тока. Для этой цели применяются генераторы, принцип действия которых основан на вращении плоской рамки в магнитном поле (см. Рисунок 17)

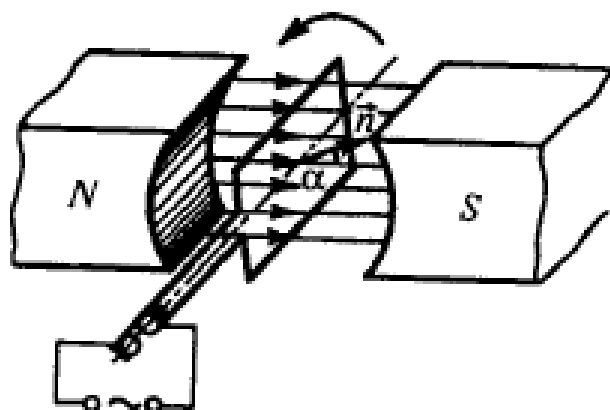


Рисунок 17 Вращение плоской рамки в магнитном поле.

При равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле в ней возникает переменная ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону:

$$\Theta_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin\omega t \quad (53)$$

где максимальное значение ЭДС индукции:

$$\Theta_{\max} = BS\omega \quad (54)$$

тогда:

$$\Theta_i = \Theta_{\max} \sin \omega t \quad (55)$$

Если по рамке, помещённой в магнитное поле, пропускать электрический ток, то на неё будет действовать вращающий момент

$$\vec{M} = IS[\vec{n}, \vec{B}] \quad (56)$$

И рамка начнёт вращаться, на этом принципе основана работа электродвигателей.

Индукционные токи, возникающие в массивных сплошных проводниках, помещённых в переменное магнитное поле, называются вихревыми токами или токами Фуко.

Электрический ток в замкнутом контуре создаёт магнитное поле, индукция которого пропорциональна току, поэтому сцеплённый с контуром магнитный поток пропорционален току в контуре:

$$\Phi = LI \quad (57)$$

где коэффициент пропорциональности называется L индуктивностью.

Индуктивность длинного соленоида:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} \quad (58)$$

где N - число витков соленоида,
 l - его длина,
 S - площадь,
 μ - магнитная проницаемость сердечника.

Индуктивность контура в общем случае зависит только от геометрической формы контура, его размеров и магнитной проницаемости той среды, в которой он находится.

Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нём силы тока называется самоиндукцией.

Единица индуктивности - генри (Гн).

ЭДС самоиндукции:

$$\Theta_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) \quad (59)$$

7

Если контур не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, то $L = \text{const}$, и э.д.с. самоиндукции равна:

$$\Theta_s = -L \frac{dI}{dt} \quad (60)$$

где знак минус, обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения тока в нём.

При выключении цепи сопротивлением R и индуктивностью L сила тока убывает не мгновенно, а по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (61)$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ - время релаксации, время в течении которого сила тока убывает в e раз.

При включении источника сила тока возрастает по экспоненциальному закону (а не мгновенно) (см. Рисунок 18):

$$I = I_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (62)$$

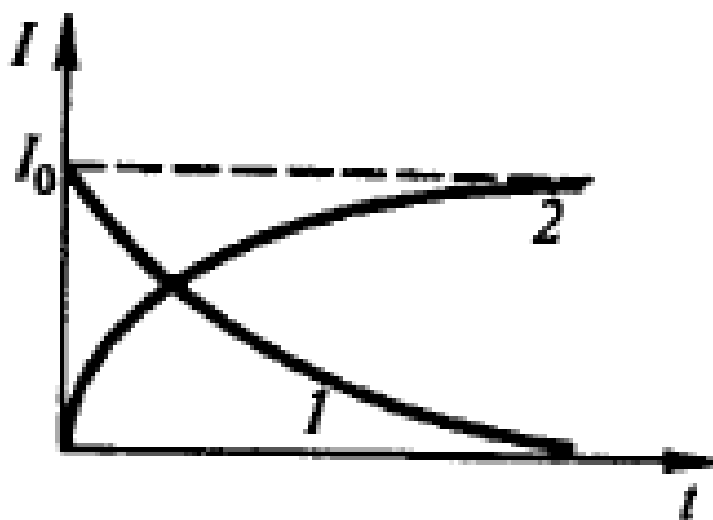


Рисунок 18 Токи при размыкании и замыкании цепи

Взаимной индукцией называется явление возбуждения э.д.с. электромагнитной индукции в одной электрической цепи при изменении электрического тока в другой цепи или при изменении взаимного расположения этих двух частей.

Рассмотрим два неподвижных контура 1 и 2 с токами I_1 и I_2 расположенных достаточно близко друг от друга (см. рисунок 19),

При протекании в контуре 1 тока I_1 магнитный поток пронизывает второй контур: $\Phi_{21} = L_{21}I_1$, аналогично $\Phi_{12} = L_{12}I_2$.

Коэффициенты пропорциональности L_{21} и L_{12} равны друг другу $L_{12} = L_{21} = L$ называется **взаимной индуктивностью контуров**.

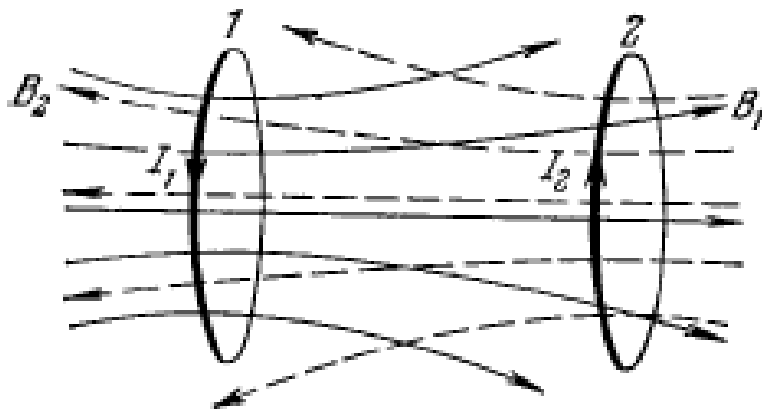


Рисунок 19 Взаимная индукция

При изменении силы тока в одном из контуров, в другом индуцируется ЭДС:

$$\Theta_{i2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L \frac{dI_1}{dt}, \quad \Theta_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L \frac{dI_2}{dt} \quad (63)$$

Взаимная индуктивность контуров зависит от геометрической формы, размеров, взаимного расположения контуров и от магнитной проницаемости окружающего контура среды.

Взаимная индуктивность двух катушек, намотанных на тороидальный сердечник:

$$L = \frac{\Psi}{I_1} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S \quad (64)$$

Принцип действия трансформаторов, применяемых для повышения или понижения напряжения переменного тока основан на явлении электромагнитной индукции.

Переменный ток I_1 создаёт в первичной обмотке переменное магнитное поле. Это вызывает во вторичной обмотке появление ЭДС взаимной индукции. (см. Рисунок 20)

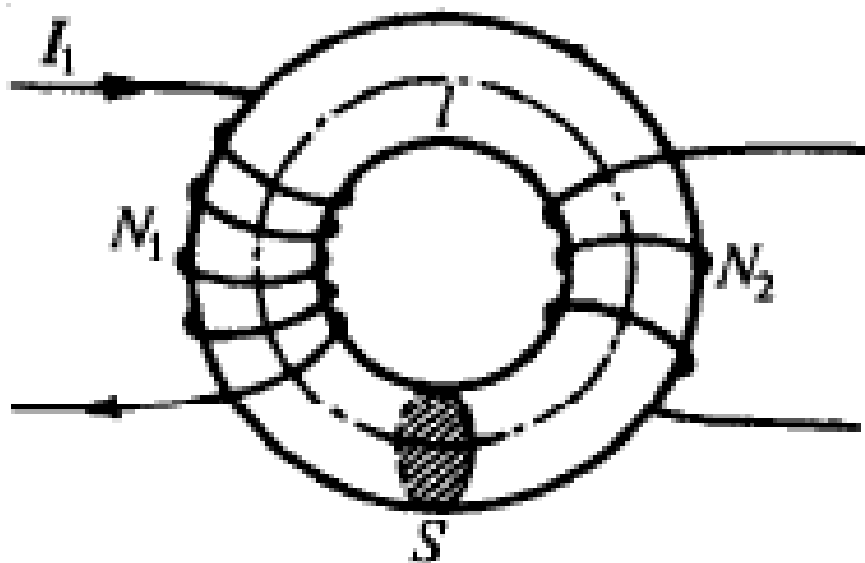


Рисунок 20. Трансформатор

При этом:

$$\Theta_2 = \frac{N_1}{N_2} \Theta_1 \quad (65)$$

где N_1 и N_2 - число витков в первичной и вторичной обмотке соответственно.

Отношение

$$k = \frac{N_2}{N_1} \quad (66)$$

показывающее во сколько раз ЭДС во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше), чем в первичной, называется коэффициентом трансформации.

Если $k > 1$, то трансформатор – повышающий,
если $k < 1$, понижающий.

Энергия магнитного поля равна работе, которую затрачивает ток на создание этого поля.

Энергия магнитного поля, связанного с контуром:

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (67)$$

Энергия магнитного поля соленоида:

$$W = \frac{1}{2} \mu \mu_0 \frac{N^2 I^2}{l} S \quad (68)$$

Объёмная плотность энергии магнитного поля:

$$\varpi = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{BH}{2} \quad (69)$$

2.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 7.

В однородном магнитном поле с индукцией B равномерно вращается рамка, содержащая N витков с частотой n . Площадь рамки равна S . Мгновенное значение э.д.с. равно ε_i при угле поворота рамки равном α .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 7):

Таблица 7

Вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B, \text{Тл}$	0,1	1,0	0,8	0,9	0,5	0,7	1,6	1,4	1,3	1,2
$N,$	1000									
$n, \text{с}^{-1}$	10									
$S, \text{см}^2$	150	70	85	75	90	40	12	64	56	76
ε_i, B	*	4	6	2	1	3	5	5	6	2
$\alpha, ^\circ$	30									

Пример решения 1 варианта

Дано:

$$B = 0,1 \text{ Тл.}$$

$$N = 1000$$

$$S = 150 \text{ см}^2 = 150 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$n = 10 \text{ с}^{-1}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

Найти:

$$\varepsilon_i - ?$$

Решение.

Мгновенное значение ЭДС индукции ε_i определяется основным уравнением электромагнитной индукции Фарадея:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (70)$$

Потокосцепление рассчитывается по формуле:

$$\Psi = N\Phi \quad (71)$$

где

N – число витков, пронизываемых магнитным потоком Φ .

Подставим выражение Ψ в формулу (70) и получим:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (72)$$

При вращении рамки магнитный поток, пронизывающий рамку в момент времени t , изменяется по закону:

$$\Phi = BS \cos \omega t \quad (73)$$

где

B – магнитная индукция

S – площадь рамки

ω – угловая частота

Подставив в формулу (72) выражение Φ и продифференцировав по времени найдем мгновенное значение ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = NBS\omega \sin \omega t \quad (74)$$

Угловая частота ω связана с частотой n вращения соотношением

$$\omega = 2\pi n \quad (75)$$

Подставив в формулу (74) и заменив ωt на угол α , получим:

$$\varepsilon_i = 2\pi n NBS \sin \alpha \quad (76)$$

Подставим численные значения и получим:

$$\varepsilon_i = 2\pi n NBS \sin \alpha = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 1000 \cdot 0,1 \cdot 150 \cdot 10^{-4} \cdot \sin 30^\circ = 47,1(\text{В})$$

Ответ:

$$\varepsilon_i = 47,1(\text{В})$$

Остальные варианты аналогичны вариантам представленным выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

2.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 8

Проволочная квадратная рамка со стороной a , содержащая N витков, находится в однородном магнитном поле.

Угол между плоскостью рамки и вектором магнитной индукции B поля равен φ .

Магнитный поток, пронизывающий рамку, Φ . Вращательный момент действующий на рамку равен M . Сила тока, текущего в рамке равна I .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 8):

Таблица 8

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a , см	*	15	10	8	15	*	7	10	8	12
N	30	*	70	100	80	40	*	20	90	60
B , Тл	0,2	0,1	*	0,4	0,2	0,7	0,2	*	0,6	0,1
φ , град	90	60	25	*	15	10	20	15	*	60
Φ , мВб	50	195	253	128	*	30,4	33,5	207	271	*
I , А	0,1	2	0,3	0,8	1,2	0,3	1,6	1,5	1,4	0,8

Задача 9.

Проводящий контур в форме кругового витка радиусом r , изготовленного из металлической проволоки диаметром d , пронизывается магнитным полем с магнитной индукцией B .

При изменении направления магнитного поля на противоположное через поперечное сечение витка проходит заряд q .

Нормаль к плоскости витка совпадает с линиями индукции поля. Род металла указан в таблице.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 9):

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Металл	Al	Ag	Cu	Al	Cu	Al	Ag	Cu	Ag	Cu
r , см	*	6	9	11	*	3	7	4	*	5
d , мм	1	*	1,5	2	1	*	0,9	0,9	0,5	*
B , мТл	0,7	1	*	0,8	1,2	0,4	*	0,9	0,7	0,8
q , Кл	1,6	1,9	2,8	*	2,8	0,76	2,5	*	0,98	10

Задача 10

При силе тока I энергия магнитного поля соленоида индуктивностью L равна W , а магнитный поток в соленоиде Φ .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 10):

Таблица 10

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I, A	0,8	*	5,0	*	2,0	*	8,0	*	4,0	
$L, Гн$	1,1	0,4	*	*	*	0,7	0,2	0,5	*	*
$W, Дж$	*	3,2	*	0,8	0,5	*	*	9,0	*	4,0
$\Phi, Вб$	*	*	2,0	0,4	*	1,4	*	*	0,8	2,0

Задача 11

Прямой провод длиной $l = 40\text{ см}$ движется в однородном магнитном поле со скоростью $v = 5\text{ м/с}$ перпендикулярно линиям индукции. Разность потенциалов U между концами провода равна $0,6\text{ В}$. Вычислить индукцию B магнитного поля.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 11):

Таблица 11

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l, \text{ см}$	40	*	5,0	*	2,0	*	8,0	*	4,0	
$v, \text{ м/с}$	5	0,4	*	*	*	0,7	0,2	0,5	*	*
$U, \text{ В}$	0,6	3,2	*	0,8	0,5	*	*	9,0	*	4,0
$B, \text{ Тл}$	*	*	2,0	0,4	*	1,4	*	*	0,8	2,0

Задача 12

По обмотке соленоида индуктивностью L течёт ток I .

Площадь поперечного сечения соленоида равна S . Длина соленоида равна l . Число витков в соленоиде равно N .

Магнитная проницаемость сердечника равна μ .

Энергия магнитного поля соленоида равна W .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 12):

Таблица 12

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L , Гн	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S , см ²										
N										
l , см.										
μ										
I , А	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
W , Дж.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Задача 13

В однородном магнитном поле с индукцией B находится прямой провод длиной l , расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции.

По проводу течёт ток I .

Под действием сил поля провод переместился на расстояние s .

Работа сил поля равна A

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 13):

Таблица 13

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B , Тл.	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
l , см	5	6	8	10	20	15	7	12	14	16
I , А	2	1	5	3	7	9	4	8	0,5	10
s , см	8	12	4	5	9	10	1	20	30	40
A , Дж	*									

3. Магнитные свойства вещества

3.1 Основные теоретические понятия и формулы

Микроскопические токи – (микротоки) – обусловленные движением электронов в атомах и молекулах.

Орбитальный магнитный момент электрона:

$$p_m = IS = evS \quad (77)$$

если электрон движется по часовой стрелке, то ток направлен против часовой стрелки и вектор p_m (в соответствии с правилом правого винта) направлен перпендикулярно плоскости орбиты электрона. (см. Рисунок 21)

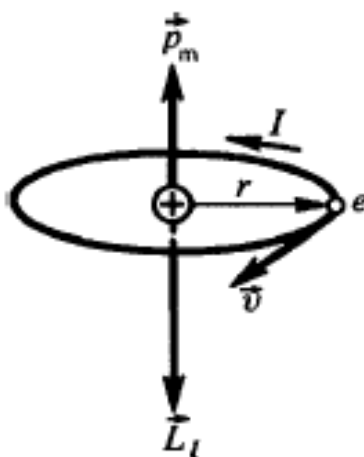


Рисунок 21. Орбитальный момент электрона

Орбитальный механический момент электрона (механический момент импульса)

$$L_l = mvr = m\omega r^2 = 2m\nu S \quad (78)$$

где $\omega = 2\pi\nu$, угловая скорость электрона,
 $\pi^2 = S$.

Направления векторов $\vec{p}$ и $\vec{L}_l$ противоположны, поэтому:

$$\vec{p}_m = evS = -\frac{e}{2m} \vec{L}_l = \Gamma \vec{L}_l \quad (79)$$

где величина $\Gamma = -\frac{1}{2}\left(\frac{e}{m}\right)$ называется **гиромагнитным отношением орбитальных моментов**.

$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ - **удельный заряд электрона**.

Спин электрона – это собственный механический момент импульса $\vec{L}_s$.

Спину электрона соответствует собственный спиновый магнитный момент $\vec{p}_{ms}$.

Проекция спина на направление вектора $\vec{B}$ может принимать только одно из следующих значений:

$$p_{msB} = \pm \frac{e\hbar}{2m_e} = \pm \mu_B \quad (80)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,06 \text{ Дж} \cdot \text{с}$,

$\mu_B = 9,27 \cdot \frac{10^{-24} \text{ Дж}}{\text{Тл}}$ - магнетон Бора, являющийся единицей магнитного момента электрона.

Общий магнитный момент атома или молекулы равен векторной сумме магнитных моментов (орбитальных или спиновых) входящих в атом (молекулу) электронов:

$$\vec{p}_a = \sum \vec{p}_m + \sum \vec{p}_{ms} \quad (81)$$

Всякое вещество является магнетиком, то есть способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент – намагничиваться.

Теорема Лармора:

действие магнитного поля на электронную орбиту можно свести к сообщению этой орбите прецессии с угловой скоростью Ω .

Прецессионное движение электронных орбит эквивалентно круговому микротоку, наличие которого согласно правилу Ленца является причиной возникновения у атома магнитного момента, направленного против внешнего поля.

*Наведённые составляющие магнитных полей атомов складываются и образуют собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле. Этот эффект получил название **диамагнитного эффекта**, а вещества намагничивающиеся во внешнем магнитном поле против направления поля называются **диамагнетиками**. (например Ag, Au, Cu) (см. Рисунок 22)*

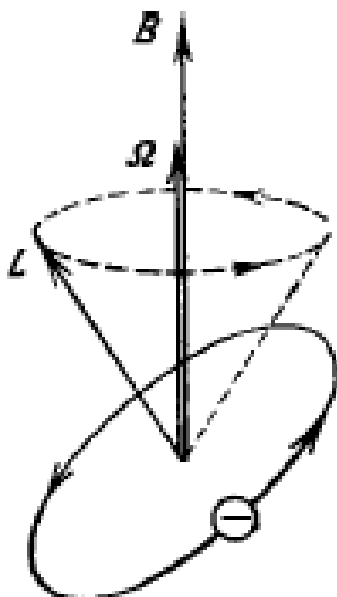


Рисунок 22 Ларморова прецессия

***Парамагнитное вещество** – это вещество, которое намагничивается во внешнем магнитном поле по направлению поля. (пример: редкоземельные металлы, Pt, Al....)*

При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов (молекул) по полю (полной ориентации препятствует тепловое движение атомов).

*Парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающим его. Такой эффект носит название **парамагнитного**.*

Парамагнетики втягиваются в область сильного поля, а диамагнетики – выталкиваются из области сильного поля.

Намагниченность – векторная величина, определяемая магнитным моментом единицы объёма магнетика:

$$\vec{j} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{p}_a}{V} \quad (82)$$

где $\vec{P}_m = \sum \vec{p}_a$ - магнитный момент магнетика, равный векторной сумме магнитных моментов отдельных молекул.

Магнитная восприимчивость вещества χ :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (83)$$

где (χ - безразмерная величина)

Для диамагнетиков χ - отрицательна ($\chi < 0$ поле молекулярных токов противоположно внешнему полю),

для парамагнетиков - положительна ($\chi > 0$ поле молекулярных токов совпадает с внешним)

Магнитная проницаемость вещества:

$$\mu = 1 + \chi = \frac{B}{B_0} \quad (84)$$

где B_0 - внешнее поле, создаваемое намагничивающим током в вакууме

B - магнитное поле в веществе.

Для диамагнетиков $\mu < 1$, для парамагнетиков $\mu > 1$.

Удельная магнитная восприимчивость $\chi_{уд.}$ связана с магнитной восприимчивостью:

$$\chi_{уд.} = \chi / \rho \quad (85)$$

Молярная магнитная восприимчивость χ_m связана с магнитной восприимчивостью χ соотношением:

$$\chi_m = \frac{\mu}{\rho} \chi \quad (86)$$

Магнитная индукция $\vec{B}$, напряжённость $\vec{H}$ и намагниченность $\vec{J}$ в изотропном магнетике связаны соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) \quad (87)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Намагниченность изотропного парамагнетика (по Ланжевону):

$$J = n\mu_m L(a) \quad (88)$$

где

n – концентрация молекул

μ_m – магнитный момент отдельной молекулы

$L(a)$ – функция Ланжевена.

Функция Ланжевена

$$L(a) = \frac{e^a + e^{-a}}{e^a - e^{-a}} - \frac{1}{a} \quad (89)$$

где

$$a = \frac{\mu_m B}{(kT)}$$

Приближённое значение функции Ланжевена можно представить в виде знакпеременного ряда:

$$L(a) = \frac{1}{3}a - \frac{1}{45}a^3 + \frac{2}{945}a^5 - \dots \quad (90)$$

При $a \ll 1$, ($\mu_m B \ll kT$), тогда $L(a) \approx \frac{1}{3}$ и намагниченность

$$J = \frac{n\mu_m}{3kT} \quad (91)$$

Или:

$$J = \mu_0 \frac{n\mu_m^2}{3kT} \quad (92)$$

Магнитная восприимчивость парамагнитных веществ при $\mu_m B \ll kT$:

$$\chi = \mu_0 \frac{n\mu_m^2}{3kT} \quad (93)$$

Закон полного тока для магнитного поля в веществе:

Циркуляция вектора магнитной индукции по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов проводимости и молекулярных токов, охватываемых этим контуром, умноженной на магнитную постоянную:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint B_l dl = \mu_0 (I + I') \quad (94)$$

где I и I' - соответственно алгебраические суммы макротоков (токов проводимости) и микротоков (молекулярных токов), охватываемых произвольным замкнутым контуром L .

Теорема о циркуляции вектора $\vec{H}$:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I \quad (95)$$

или

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S} \quad (96)$$

Условия на границе двух магнетиков

$$B_{n1} = B_{n2}, \frac{H_{n1}}{H_{n2}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}, H_{\tau1} = H_{\tau2}, \frac{B_{\tau1}}{B_{\tau2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (97)$$

Т.е. при переходе через границу раздела двух магнетиков нормальная составляющая вектора $\vec{B}$ и тангенциальная составляющая вектора $\vec{H}$ изменяются непрерывно, а тангенциальная составляющая вектора $\vec{B}$ и нормальная составляющая вектора $\vec{H}$ претерпевают скачок.

Ферромагнетики – это сильномагнитные вещества, обладающие спонтанной намагниченностью, т.е. они сохраняют намагниченность при отсутствии внешнего магнитного поля.

У ферромагнетиков при увеличении напряжённости внешнего магнитного поля намагниченность растёт сначала быстро, а потом выходит на насыщение $J_{\text{нас}}$. (см. Рисунок 23)

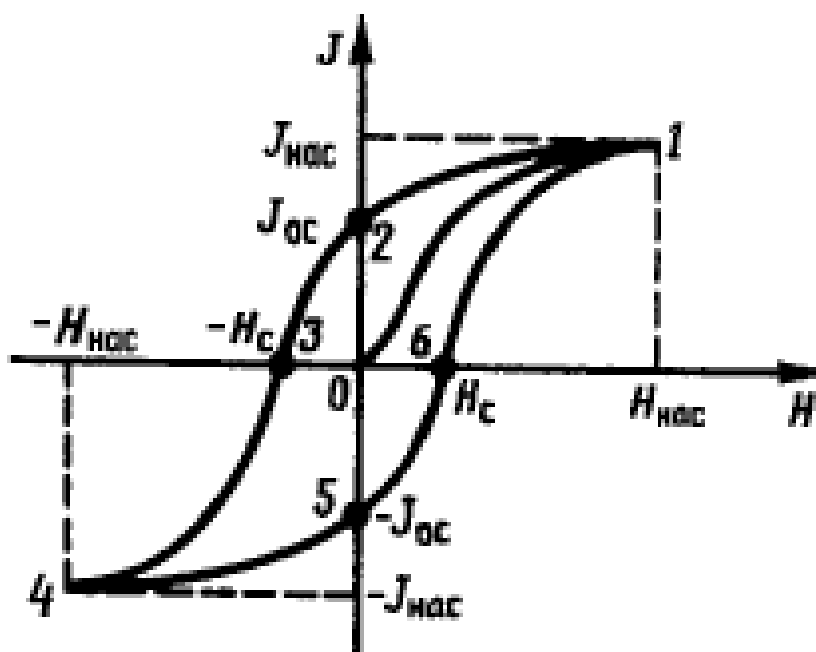


Рисунок 23 Петля гистерезиса.

Зависимость намагниченности J от напряжённости магнитного поля H определяется предысторией намагничения. Это явление называется магнитным гистерезисом.

Если ферромагнетик намагнитить до насыщения, а затем уменьшать напряжённость магнитного поля, то при $H = 0$ в ферромагнетике останется остаточная намагниченность $J_{\text{ос}}$. Это явление используют при изготовлении постоянных магнитов.

Для того, чтобы уменьшить намагниченность до нуля, надо приложить противоположно – направленное поле, с напряжённостью H_c – которая называется **коэрцитивной силой**. При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик перемагничивается. Затем его вновь можно размагнитить и перемагнитить до насыщения. *Изменение намагниченности описывается кривой, которая носит название **петли гистерезиса**.*

*Для каждого ферромагнетика существует определённая температура, называемая **точкой Кюри**, при которой он теряет свои магнитные свойства.*

При нагревании выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик.

3.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 14.

Магнитная восприимчивость металла равна χ . Молярная масса металла равна M . Молярная магнитная восприимчивость висмута металла равна χ_m . Плотность металла равна ρ . Удельная магнитная восприимчивость равна $\chi_{уд}$.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 14):

Таблица 14

№ вар.	1	2	3	4	5
χ	*	0,02	0,03	0,04	0,05
M , кг/моль	0,209	6	8	10	20
χ_m , м ³ /моль	*	1	5	3	7
ρ , кг/м ³	$9,8 \cdot 10^3$		4	5	9
$\chi_{уд}$, м ³ /кг	$-1,3 \cdot 10^{-9}$				

Пример решения 1 варианта

Дано:

$$M = 0,209 \text{ кг/моль}$$

$$\rho = 9,8 \cdot 10^3$$

$$\chi_{уд} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$$

Найти:

$$\chi - ?$$

$$\chi_m - ?$$

Решение:

Магнитная восприимчивость определяется формулой:

$$\chi = J/H \quad (98)$$

где

J — намагниченность

H — напряжённость магнитного поля

Намагниченность, в свою очередь, определяется следующей формулой:

$$J = |\vec{J}| = \left| \sum \mu_{M_i} \right| / V \quad (99)$$

где,

$\sum \mu_{M_i}$ — суммарный магнитный момент всех молекул в объёме V (магнетик предполагается однородным)

Соответственно:

$$\chi_m = J_m / H \quad (100)$$

и

$$J_m = \sum \mu_{M_i} / \nu \quad (101)$$

где ν — количество вещества (число молей данного вещества),

и:

$$\chi_{уд} = J_{уд} / H \quad (102)$$

соответственно

$$\chi_{уд} = \sum \mu_{M_i} / m \quad (103)$$

Для определения удельной магнитной восприимчивости найдём отношение:

$$\chi / \chi_{уд.} = J / J_{уд.} = m / V = \rho$$

откуда:

$$\chi = \rho \cdot \chi_{уд.} \quad (104)$$

где ρ — плотность.

Подставим численные значения и получим:

$$\chi = 9,8 \cdot 10^3 \cdot (-1,3 \cdot 10^{-9}) \approx -1,3 \cdot 10^{-5}$$

Для определения молярной магнитной восприимчивости найдём отношение:

$$\chi_m / \chi_{уд.} = J_m / J_{уд.} = m / \nu = M$$

где М – молярная масса

Тогда:

$$\chi_m = M \chi_{уд.} \quad (105)$$

Подставим численные значения и произведём вычисления:

$$\chi_m = 0,209 \cdot (-1,3 \cdot 10^{-9}) \approx -2,7 \cdot 10^{-10} (\text{м}^3 / \text{моль})$$

Ответ:

$$\chi \approx -1,3 \cdot 10^{-5}$$

$$\chi_m \approx -2,7 \cdot 10^{-10} (\text{м}^3 / \text{моль})$$

Остальные варианты аналогичны вариантам представленным выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

3.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 15.

Намагниченность тела при насыщении равна J . Магнитный момент каждого атома равен магнетону Бора μ_B . Концентрация атомов равна n .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 15):

Таблица 15

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n, \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$	6	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
$J, \text{ А/м}$	*	6	8	10	20	15	7	12	14	16

Задача 16

Напряжённость магнитного поля в металле равно H . Намагниченность меди равна J . Магнитная индукция поля равна B . Удельная магнитная восприимчивость металла равна $\chi_{\text{уд}}$.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 16):

Таблица 16

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H, \text{ М А/м}$	1	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
$J, \text{ А/м}$	*	6	8	10	20	15	7	12	14	16
$B, \text{ Тл.}$	*									
$\chi_{\text{уд}}, \text{ м}^3/\text{кг}$	Сu									

Примечание. Удельную магнитную восприимчивость металла см. в Приложении.

4. Переменный электрический ток

4.1 Основные теоретические понятия и формулы

Переменным электрическим током называется электрический ток, который изменяется со временем по величине и направлению.

Чаще всего термин «переменный ток» применяют к токам, зависящим от времени по гармоническому закону.

Мгновенные значения синусоидальных токов, напряжений и э.д.с. в любой момент времени выражают формулами:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \cos(\omega t + \psi_i) \\ u(t) &= U_m \cos(\omega t + \psi_u) \\ e(t) &= \Theta_m \cos(\omega t + \psi_e) \end{aligned} \quad (106)$$

где I_m, U_m, Θ_m - соответственно амплитудные значения силы тока, напряжения и э.д.с.

ψ_i, ψ_u, ψ_e - начальные фазы тока, напряжения и э.д.с. Начальная фаза определяет мгновенное значение электрической величины в момент времени $t = 0$

Интервал времени, через который повторяются мгновенные значения электрической величины, называют периодом T .

Величину обратную периоду называют частотой переменного тока
$$f = \frac{1}{T}.$$

Стандартная частота переменного тока в энергетических системах СНГ $f = 50 \text{ Гц}$.

Величину $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ называют угловой частотой и выражают в радианах в секунду.

Аргумент косинуса, т.е. величину $\omega t + \psi$ называют фазой.

Цепь переменного тока с резистором.

Рассмотрим цепь переменного тока с резистором, имеющим только омическое сопротивление R (см. Рисунок 24) К зажимам ab приложено переменное напряжение

$$U_R = U_{mR} \cos(\omega t) \quad (107)$$

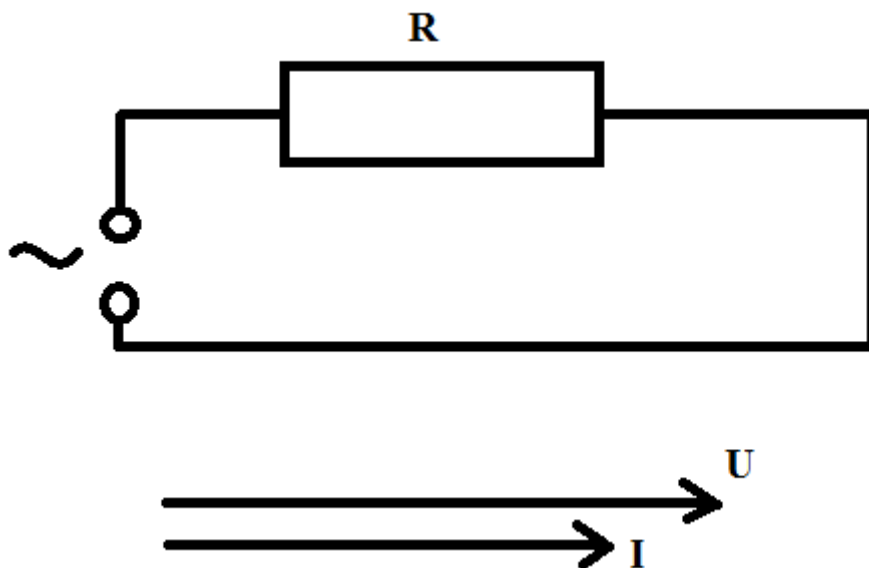


Рисунок 24. Электрическая цепь переменного тока с резистором.

Используя закон Ома, получим выражение для силы тока:

$$I = \frac{U_{mR}}{R} \cos(\omega t) = I_m \cos(\omega t) \quad (108)$$

где $I_m = \frac{U_{mR}}{R}$ - амплитуда силы тока.

Получили, что сила тока и напряжение изменяются в одной фазе, что представляется в виде векторной диаграммы (см Рисунок 24) На диаграмме амплитуды U_{mR} и I_m представлены как одинаково направленные векторы, равномерно вращающиеся против часовой стрелки с угловой скоростью ω .

Цепь переменного тока с катушкой индуктивности.

Рассмотрим цепь с катушкой индуктивности, индуктивность которой L , омическое сопротивление равно нулю (см. Рисунок 25).

Напряжение на зажимах ab цепи выражается так:.

$$U_L = U_{mL} \cos(\omega t) \quad (109)$$

Для участка ab закон Ома запишется в форме:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \Theta - I(R + r) \quad (110)$$

так как $R + r = 0$, получаем:

$$-U_L = \varphi_a - \varphi_b = \Theta \quad (111)$$

в этой формуле под Θ следует понимать только э.д.с. самоиндукции, так как э.д.с. внешнего источника не входит в участок ab .

Подставляя выражение для напряжения в закон Ома получаем:

$$U_{mL} \cos(\omega t) = L \frac{dI}{dt} \quad (112)$$

Разделив переменные в этом уравнении проинтегрируем его:

$$dI = \frac{U_{mL}}{L} \cos(\omega t) dt, \quad \int dI = \frac{U_{mL}}{L} \int \cos(\omega t) dt \quad (113)$$

отсюда:

$$I = \frac{U_{mL}}{L\omega} \sin(\omega t) + const \quad (114)$$

Постоянный член в уравнении равен нулю, так как в цепи действует только переменное напряжение и нет причин для появления постоянной составляющей силы тока. Окончательно получаем:

$$I = \frac{U_{mL}}{L\omega} \sin(\omega t) = I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (115)$$

где $I_m = \frac{U_{mL}}{\omega L}$ - амплитуда силы тока.

Фаза силы тока $\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$, а фаза напряжения $\frac{\pi}{2}$, что показано на векторной диаграмме. (см. Рисунок 25)

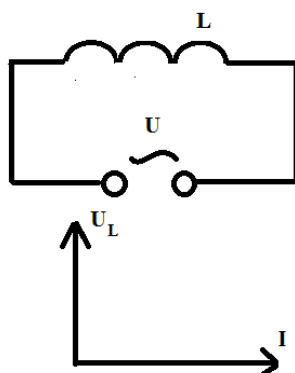


Рисунок 25 Электрическая цепь переменного тока с катушкой индуктивности

Сравнивая с законом Ома для участка цепи постоянного тока заметим, что выражение $X_L = L\omega$ *играет роль сопротивления цепи, которое называют индуктивным. Это сопротивление вместе с U_{mL} определяет амплитуду силы тока: чем больше частота ω и индуктивность L , тем меньше I_m .*

Если в цепи имеется только индуктивное сопротивление, то количество теплоты в ней не выделяется, так как $R=0$. Роль катушки сводится к накоплению энергии магнитного поля и возвращению этой энергии обратно источнику тока. Таким образом, происходит периодическая перекачка энергии от источника в цепь и от цепи к источнику, в идеальном случае без потери энергии.

Цепь переменного тока с конденсатором.

Рассмотрим цепь переменного тока с конденсатором электроёмкостью C , омическое сопротивление которого бесконечно велико (см. рисунок 26). Напряжение на зажимах цепи выражается следующей зависимостью:

$$U_C = U_{mC} \cos(\omega t) \quad (116)$$

Сила тока в цепи определяется скоростью изменения заряда на обкладках конденсатора.

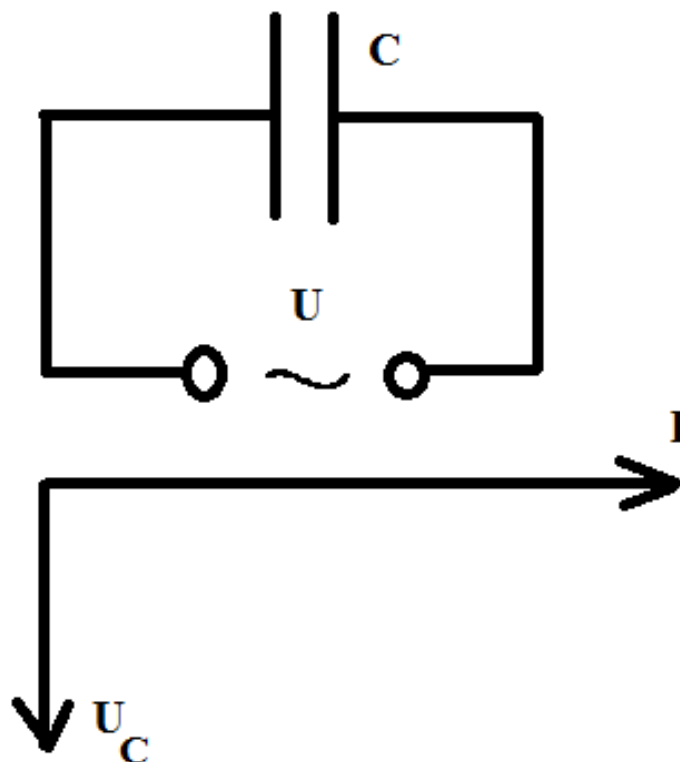


Рисунок 26 Электрическая цепь переменного тока с емкостью

Используя соотношение для электроёмкости находим:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CU_c)}{dt} = \frac{CdU_c}{dt} \quad (117)$$

можно записать для тока:

$$I = -U_{mC} \sin(\omega t) = I_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (118)$$

где $I_m = U_{mC}C\omega$.

Фаза силы тока $\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, а фаза напряжения $\frac{\pi}{2}$. Следовательно, сила тока опережает по фазе напряжение на $\frac{\pi}{2}$, что показано на векторной диаграмме (см. рисунок 26).

Сравнивая с законом Ома для участка цепи переменного тока, заметим, что выражение $X_C = \frac{1}{C\omega}$ *играет роль сопротивления цепи, которое называют ёмкостным. Оно определяет амплитуду силы тока: чем меньше электроёмкость C и частота ω , тем меньше I_m .*

Для постоянного тока ёмкость является бесконечно большим сопротивлением и тока в такой цепи не будет.

В данном случае количество теплоты в цепи не выделяется, так как сопротивление проводников равно нулю. Нагревание диэлектрика в переменном электрическом поле не учитывается. Роль конденсатора сводится к накоплению энергии электрического поля и возвращению этой энергии обратно источнику тока. Происходит периодическая перекачка энергии от источника в цепь и от цепи к источнику, в идеальном случае без потери энергии.

Полное сопротивление в цепи переменного тока.

Рассмотрим цепь, в которой последовательно соединены резистор, катушка индуктивности и конденсатор (см. рисунок 27).

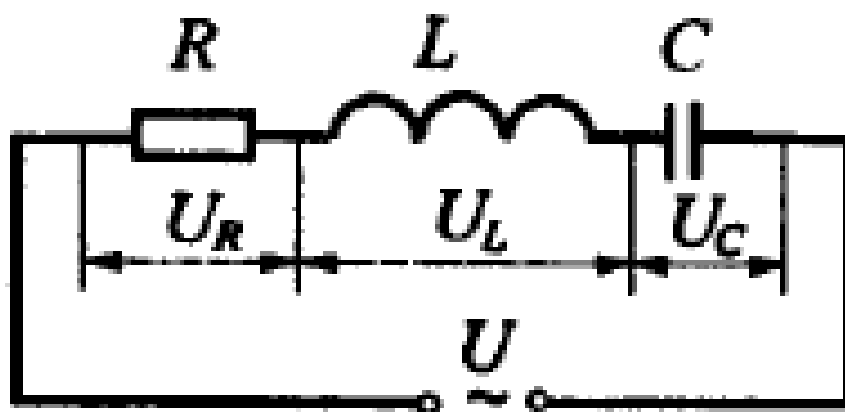


Рисунок 27. Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением R, L, C .

Напряжение на зажимах цепи, создаваемое внешним источником, как и в предыдущих примерах, изменяется по гармоническому закону с амплитудой U_m

$$U = U_m \cos(\omega t) \quad (119)$$

В общем случае сила тока в цепи и напряжение изменяются не в одной фазе, поэтому

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (120)$$

где φ - разность фаз напряжения и силы тока.

Сумма напряжений на отдельных участках равна внешнему напряжению:

$$U = U_m \cos(\omega t) = U_R + U_L + U_C \quad (121)$$

В соответствии с изложенным выше, напряжения можно записать так:

$$U_R = U_{mR} \cos(\omega t - \varphi) \quad (122)$$

- напряжение на сопротивлении R совпадает по фазе с током.

$$U_L = U_{mL} \cos\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (123)$$

- напряжение на катушке индуктивности опережает силу тока по фазе.

$$U_C = U_{mC} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (124)$$

- напряжение на конденсаторе отстаёт от силы тока по фазе .

Сумму напряжений возможно найти после соответствующих тригонометрических преобразований, но проще и нагляднее это сделать с помощью векторных диаграмм.

На рисунке 28 по оси токов направлен вектор амплитуды силы тока I_m . Так как во всей цепи амплитуда силы тока одинакова, то амплитуды напряжений на участках отложим относительно этого вектора: вектор U_{mR} - в одной фазе с силой тока, вектор U_{mL} - с опережением силы тока по фазе на $\frac{\pi}{2}$, вектор U_{mC} - с отставанием от силы тока по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Суммируя три вектора находим графически значения U_m и φ . Используя теорему Пифагора, имеем

$$U_m^2 = U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2 \quad (125)$$

отсюда, учитывая закон Ома находим:

$$I_m^2 Z^2 = I_m^2 R^2 + \left(I_m L \omega - \frac{I_m}{C \omega} \right)^2 \quad (126)$$

где Z - *полное сопротивление цепи переменного тока, называемое импедансом.*

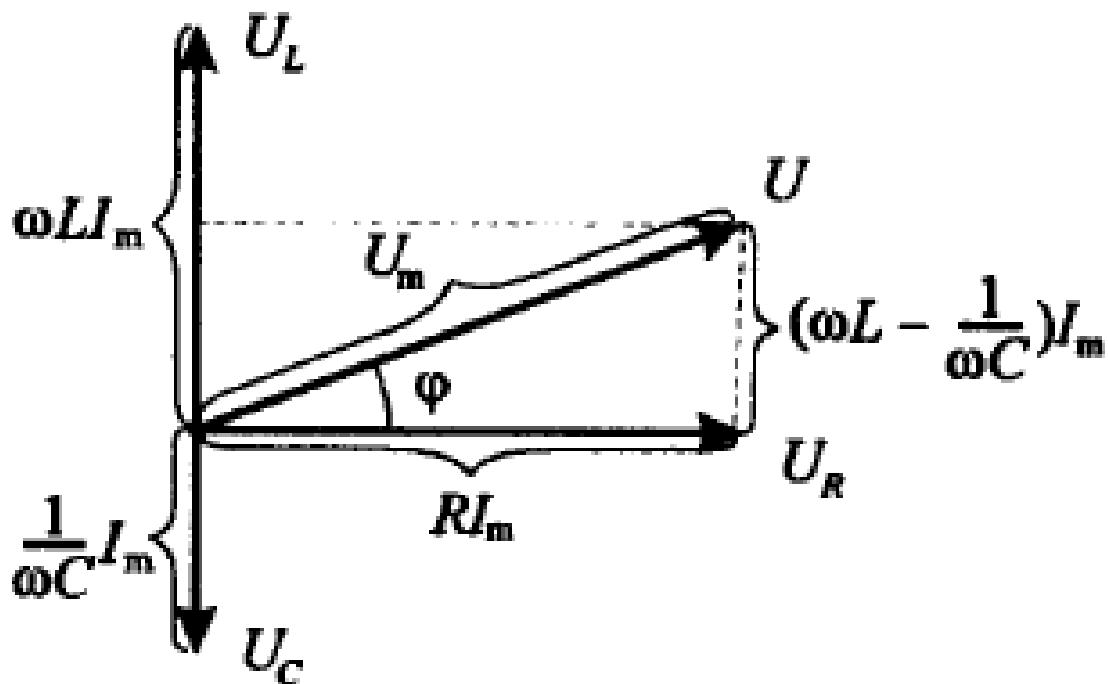


Рисунок 28. Векторная диаграмма электрической цепи переменного тока с последовательным соединением R, L, C

Импеданс находим по следующей формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (127)$$

Омическое сопротивление R цепи называют также активным, оно обуславливает выделение количества теплоты в цепи в соответствии с законом Джоуля – Ленца.

Разность индуктивного и ёмкостного сопротивлений $(X_L - X_C)$ называют реактивным сопротивлением. Оно не вызывает нагревания элементов цепи.

Закон Ома применительно к амплитудам напряжения и силы тока в цепи:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (128)$$

Найдём также выражение для φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{mL} - U_{mC}}{U_{mR}} = \frac{I_m L \omega - \frac{I_m}{C \omega}}{I_m R} = \frac{L \omega - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (129)$$

Если индуктивное и ёмкостное сопротивления цепи при их последовательном соединении будут одинаковы $X_L = X_C$, то $Z = R$. Это означает, что сила тока и приложенное напряжение изменяются в одной фазе так, как будто в цепи имеется только омическое сопротивление.

Напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе одинаковы по амплитуде и противоположны по фазе.

Такой случай вынужденных электрических колебаний называют **резонансом напряжений**.

Так как $U_{mL} = U_{mC}$ то.

$$L \omega_{\text{рез.}} = \frac{1}{C \omega_{\text{рез.}}} \quad (130)$$

Отсюда находим резонансную круговую частоту:

$$\omega_{\text{рез.}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (131)$$

При этом условии полное сопротивление цепи имеет наименьшее значение, равное R . (при данных R, L, C), а сила тока достигает наибольшего значения.

Мощность переменного тока.

Чтобы вычислить мощность переменного тока, подставим в выражение для мощности силу тока и напряжение:

$$P = U_m I_m \cos \omega t \cos(\omega t - \varphi) \quad (132)$$

используя формулу тригонометрии

$$\cos \alpha \cos \beta = \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (133)$$

преобразуем выражение для мощности и получаем:

$$P = \frac{I_m U_m}{2} [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos \varphi] \quad (134)$$

Как видно из формулы, мощность может быть как положительной, т.е. энергия от источника тока поступает в цепь, так и отрицательной – убыль энергии в цепи.

Практически важно знать среднюю за период мощность, так как только эта величина характеризует энергию, потребляемую электрической цепью в единицу времени.

Среднее значение $\cos(2\omega t - \varphi)$ за период равно нулю, $\cos \varphi$ от времени не зависит, поэтому усреднение формулы для мощности приводит к следующему результату:

$$\langle P \rangle = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi \quad (135)$$

Таким образом, средняя мощность переменного тока, потребляемая цепью переменного тока зависит от величины $\cos \varphi$.

$\cos \varphi$ – называют коэффициентом полезной мощности

Если реактивное сопротивление цепи переменного тока равно нулю, то в этом случае средняя мощность, которая выделяется в цепи переменного тока будет максимальна.

Если активное сопротивление цепи равно 0, то средняя мощность, потребляемая цепью равна нулю. Энергия, которая поступает в цепь в первую половину периода возвращается источнику в течении второй половины периода.

Электроэнергия используется наиболее полно в тех случаях, когда она не возвращается источнику. Поэтому на промышленных предприятиях с большим потреблением энергии при наличии в сети индуктивностей (трансформаторы, электромоторы и т.д.) увеличение $\cos \varphi$ является важной задачей.

Действующей, или эффективной силой переменного тока $I_{эф}$ называется такой постоянный ток, который выделяет в цепи с сопротивлением R количество теплоты, одинаковое с переменным током:

$$\langle P \rangle = P \quad (136)$$

$$\frac{I_m^2 R}{2} = I_{\text{эф}}^2 R \quad (137)$$

Откуда

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (138)$$

Действующее напряжение переменного тока:

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (139)$$

Средняя мощность

$$\langle P \rangle = U_{\text{эф}} I_{\text{эф}} \cos \varphi \quad (140)$$

Реактивная мощность – показывает интенсивность обмена энергией между генератором и реактивными элементами:

$$Q = U_{\text{эф}} I_{\text{эф}} \sin \varphi$$

Единица измерения реактивной мощности – ВАР – вольт-ампер реактивный.

Полная мощность – включает в себя описание и процесса перехода энергии электрического тока в тепло и другие полезные виды энергии и интенсивность обмена энергией между генератором и реактивными элементами:

$$S = U_{\text{эф}} I_{\text{эф}} \quad (141)$$

или:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (142)$$

Кроме того

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (143)$$

4.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 17

Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью L $L = 1,2 \text{ мкГн}$ и конденсатора переменной электрической ёмкости от C_1 до C_2 . Диапазон длин электромагнитных волн, которые могут вызывать резонанс в этом контуре $\lambda_1 - \lambda_2$.

Активное сопротивление контура принять равным нулю.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 17):

Таблица 17

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L, \text{ мкГн}$	1,2	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
$C_1, \text{ пФ}$	12	6	8	10	20	15	7	12	14	16
$C_2, \text{ пФ}$	80									
$\lambda_1, \text{ м}$	*									
$\lambda_2, \text{ м}$	*									

Пример решения 1 варианта.

Дано:

$$L = 1,2 \text{ мкГн}$$

$$C_1 = 12 \text{ нФ}$$

$$C_2 = 80 \text{ нФ}.$$

Найти:

$$\lambda_1 - ?$$

$$\lambda_2 - ?$$

Решение.

Длина λ электромагнитной волны, которая может вызвать резонанс в колебательном контуре, связана с периодом T колебаний контура соотношением.

$$\lambda = cT \quad (144)$$

Период колебаний в свою очередь, связан с индуктивностью L катушки и электроёмкостью C конденсатора колебательного контура соотношением (формула Томсона)

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (145)$$

Следовательно

$$\lambda = 2\pi c\sqrt{LC} \quad (146)$$

Согласно условию задачи, индуктивность контура неизменна, а электроёмкость контура может изменяться в пределах от C_1 до C_2 .

Этим значениям электроёмкости соответствуют длины волн λ_1 и λ_2 , определяющие диапазон длин волн, которые могут вызвать резонанс.

Подставим численные значения в формулу (143) и выполним вычисления:

$$\lambda_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \sqrt{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 10^{-9}} = 226(\text{м})$$

также:

$$\lambda_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \sqrt{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 10^{-9}} = 585(\text{м})$$

Ответ:

$$\lambda_1 = 226(\text{м})$$

$$\lambda_2 = 585(\text{м})$$

Остальные варианты аналогичны вариантам представленным выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

Задача 18

Цепь состоящая из последовательно соединённых резистора, сопротивлением R , ёмкостного сопротивления x_C , индуктивного сопротивления x_L включена в цепь переменного тока промышленной частоты с действующим (эффективным) значением напряжения U . Полное сопротивление цепи равно Z . Действующее значение силы тока в цепи равно I . Ёмкость конденсатора равна C . Индуктивность катушки индуктивности равна L .

Действующие значения напряжения на резисторе, конденсаторе, катушке индуктивности равны соответственно U_R, U_L, U_C

Коэффициент полезной мощности равен $\cos \varphi$.

Активная мощность потребляемая цепью переменного тока равна P . Реактивная мощность равна Q . Полная мощность переменного тока равна S .

Частота переменного тока, при которой возможен режим резонанса напряжений равна $f_{\text{рез}}$.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 18):

Таблица 18

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R, \text{Ом}$	200									
$x_L, \text{Ом}$										
$x_C, \text{Ом}$										
$L, \text{мкГн}$	1,2	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
$C, \text{пФ}$	12	6	8	10	20	15	7	12	14	16
$U, \text{В}$	80									
$Z, \text{Ом}$	*									
$I, \text{А}$	*									

Продолжение Таблицы 17

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_R, В$		0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
$U_L, В$	12	6	8	10	20	15	7	12	14	16
$U_C, В$	80									
$\cos\varphi$	*									
$P, Вт$	*									
$Q, ВАР$	*									
$S, ВА$	*									
$f_{рез.}$	*									

Пример решения 1 варианта.

Дано:

$$R = 2000 \Omega$$

$$X_C = 500 \Omega$$

$$X_L = 650 \Omega$$

$$U = 220 В$$

$$f = 50 Гц$$

Найти:

$$Z - ?$$

$$I - ?$$

$$C - ?$$

$$L - ?$$

$$U_R - ?$$

$$U_L - ?$$

$$U_C - ?$$

$$\cos\varphi - ?$$

$$P - ?$$

$$Q - ?$$

$$S - ?$$

$$f_{рез.} - ?$$

Решение

Определим полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 - (x_L - x_C)^2} \quad (147)$$

Подставим численные значения и получим:

$$Z = \sqrt{R^2 - (x_L - x_C)^2} = \sqrt{200^2 + (650 - 500)^2} = 250(\text{Ом})$$

По закону Ома для переменного тока найдём значение силы тока, текущего в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (148)$$

Подставим численные значения и получим:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{250} = 0,88(\text{А})$$

Найдём ёмкость конденсатора. Для этого запишем формулу ёмкостного сопротивления:

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (149)$$

Откуда получим:

$$C = \frac{1}{2\pi f x_C} \quad (150)$$

Подставим численные значения и получим:

$$C = \frac{1}{2\pi f x_C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 500} = 6,4(\text{мкФ})$$

Найдём индуктивность. Для этого запишем выражение для индуктивного сопротивления:

$$x_L = 2\pi fL \quad (151)$$

Откуда получим:

$$L = \frac{x_L}{2\pi f}$$

Подставим численные значения и получим:

$$L = \frac{x_L}{2\pi f} = \frac{650}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,07(\text{Гн})$$

Рассчитаем напряжение на резисторе. По закону Ома можно записать:

$$U_R = R \cdot I \quad (152)$$

Подставим численные значения и получим:

$$U_R = R \cdot I = 200 \cdot 0,88 = 176(\text{В})$$

Рассчитаем напряжение на конденсаторе. По закону Ома можно записать:

$$U_C = x_C \cdot I \quad (153)$$

Подставим численные значения и получим:

$$U_C = x_C \cdot I = 500 \cdot 0,88 = 440(\text{В})$$

Рассчитаем напряжение на индуктивности. По закону Ома можно записать:

$$U_L = x_L \cdot I \quad (153)$$

Подставим численные значения и получим:

$$U_L = x_L \cdot I = 650 \cdot 0,88 = 550(\text{В})$$

Найдём коэффициент полезной мощности

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad (154)$$

Подставим численные значения и получим:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{200}{250} = 0,8$$

Определим активную мощность:

$$P = UI\cos\varphi \quad (155)$$

Подставим численные значения и получим:

$$P = UI\cos\varphi = 200 \cdot 0,88 \cdot 0,8 = 140,8(\text{Вт})$$

Найдём $\sin \varphi$:

4.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 19

Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью C и катушки индуктивностью L .

Период его собственных колебаний T , частота ν , круговая частота ω , амплитуда колебаний силы тока I_m амплитуда колебаний заряда q_m .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 19):

Таблица 19

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C , пФ	*	400	800	600	*	300	200	*	400	800
L , мГн	10	*	*	*	0,2	*	0,5	40	*	*
T , мс	0,1	*	2	*		*	*	0,5	*	0,2
ν , кГц	*	50	*	*	*	100	*	*	*	*
ω , кГц	*	*	*	500	400	*	*	*	100	*
I_m мА	*	0,5	*	0,1	0,2	*	*	0,4	*	2
q_m	2	*	8	*	*	0,4	0,5	*	0,2	*

Задача 20

В идеальном колебательном контуре (емкость конденсатора C , индуктивность катушки L) происходят свободные электрические колебания с амплитудами силы тока I_m , заряда q_m , напряжения на конденсаторе U_m . В рассматриваемый момент времени сила тока в контуре I , заряд конденсатора q , напряжение на нем U .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 20):

Таблица 20

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C , мкФ	60	50	*	100	30	40	*	40	60	50
L , Гн	*	0,5	1,5	*	1,0	1,5	2,0	*	0,5	1,0
I_M , А	0,82	*	*	0,5	*	*	1,3	0,52	1,6	*
q_M , мКл	*	*	*	5,0	*	3,2	*	4,0	*	2,5
U_M , В	150	*	*	*	90	*	*	*		*
I , А	*	1,9	0,67	*	0,23	0,4	0,84	*	*	*
q , мКл	4,2	*	3,2	*	*	*	*	2,8	6	*
U , В	*	60	40	15	*	*	150	*	*	40

Задача 21

Катушка индуктивностью L присоединена к плоскому конденсатору с площадью каждой пластины S и промежутком d между ними, заполненным веществом с диэлектрической проницаемостью ε . Амплитуды силы тока в контуре I_M , напряжения на конденсаторе U_M .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 21):

Таблица 21

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L , мГн	*	40	30	128	20	25	*	50	20	31
S , см ²	20	*	25	20	15	35	30	*	15	10
d , см	0,5	0,8	*	1,0	1,2	0,4	1,0	1,4	*	0,5
ε	2,1	6	2,5	*	2,5	6	2,2	2	81	*
I_M , мА	0,15	0,1	0,2	0,1	*	0,15	0,1	0,25	0,3	0,4
U_M , В	5	20	15	10	8	*	4	10	8	20

Тема 5 Электромагнитные волны

5.1 Общие положения и формулы

Электромагнитные волны – это переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью.

Фазовая скорость электромагнитной волны:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (151)$$

Скорость света в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \quad (152)$$

Скорость распространения электромагнитных волн в веществе всегда меньше чем в вакууме.

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ напряжённостей электрического и магнитного полей волны взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору скорости $\vec{v}$ распространения волны, причём векторы $\vec{E}, \vec{H}, \vec{v}$ образуют правовинтовую систему. (см. Рисунок 12):

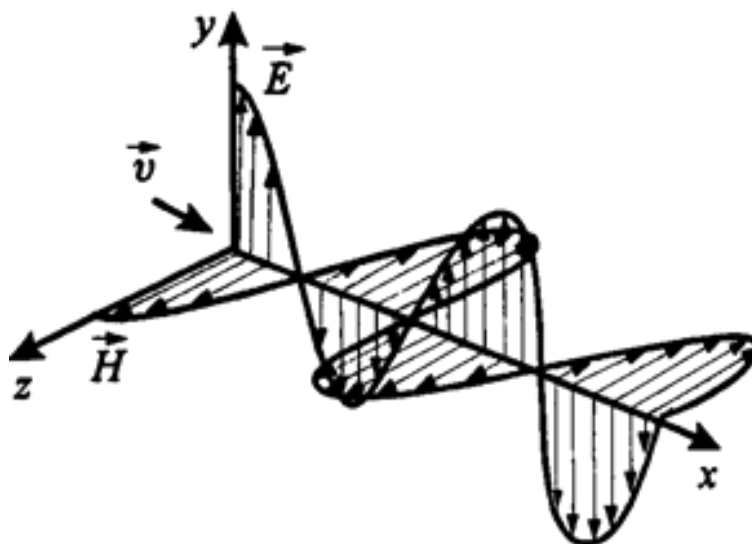


Рисунок 12 - Электромагнитная волна

В электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ всегда колеблются в одинаковых фазах, причём мгновенные значения E и H в любой точке связаны соотношением

$$\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H \quad (153)$$

Показателем преломления среды n называется величина, равная отношению скорости c электромагнитных волн в вакууме к их фазовой скорости в среде

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon \mu} \quad (154)$$

Объёмная плотность энергии электромагнитной волны.

$$\varpi = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon \mu} EH \quad (155)$$

Вектор плотности потока энергии электромагнитной волны (вектор Умова – Пойтинга)

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}] \quad (156)$$

$$S = \varpi v = EH \quad (157)$$

- (плотность потока энергии)

Интенсивность волны численно равна энергии, переносимой волной за единицу времени сквозь единицу площади поверхности, нормальной к направлению распространения волны.

Интенсивность электромагнитной волны пропорциональна квадрату её амплитуды.

$$I = \left| \langle \vec{S} \rangle \right| \quad (158)$$

5.2 Примеры решения многовариантных задач

Задача 19

Плоская электромагнитная волна распространяется в однородной и изотропной среде с диэлектрической проницаемостью равной ε и $\mu=1$. Амплитуда напряжённости электрического поля волны равна E_0 . Длина волны равна λ . Частота электромагнитной волны равна f . Фазовая скорость волны равна v . Напряжённость магнитного поля равна H_0 . Объёмная плотность энергии электромагнитной волны равна ϖ . Модуль вектора Умова – Пойтинга равен S .

Определить неизвестную физическую величину, в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 19):

Таблица 19 - численных значений физических величин для задачи 19

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε	2	7	2	*	2	7	2	7	4	2
$E_0, \text{В/м}$	12	*	8	*	24	*	*	10	*	18
$\lambda, \text{нм}$	440	380	*	*	450	*	550	*	640	*
$f, \text{ТГц}$	*	*	500	480	*	450	*	600	*	650
$v, \cdot 10^8 \text{ м/с}$	*	*	*	1,5	*	*	*	*	*	*
$H_0, \text{мА/м}$	*	25	*	12	*	15	20	*	18	*
$\varpi, \text{Дж/м}^3$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$S, \text{Вт./м}^2$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Решение

Дано: $\varepsilon = 2$ $E_0 = 12 \text{ В/м}$ $\lambda = 440 \cdot 10^{-9} \text{ м}$	Решение. Фазовая скорость электромагнитных волн определяется по формуле: $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$ где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ - скорость распространения света в вакууме. Подставим численные значения и получим: $v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{2 \cdot 1}} = 2,13 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
---	---

Определим частоту электромагнитной волны:

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

Подставим численные значения и получим:

$$f = \frac{2,13 \cdot 10^8}{440 \cdot 10^{-9}} = 0,484 \cdot 10^{15} (\text{Гц})$$

В бегущей электромагнитной волне мгновенные соотношения E и H в любой точке связаны соотношением

$$\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H$$

Тогда для амплитуд напряжённостей электрического и магнитного полей волны

$$\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} E_0 = \sqrt{\mu_0 \mu} H_0$$

Откуда искомая амплитуда напряжённости магнитного поля волны

$$H_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon}}{\sqrt{\mu_0 \mu}} E_0$$

Подставим численные значения и получим:

$$H_0 = \frac{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2}}{\sqrt{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1}} \cdot 12 = 20,37 \cdot 10^{-3} (\text{А/м})$$

Определим объёмную плотность энергии электромагнитной волны.

$$\varpi = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon \mu} E H$$

Подставим численные значения и получим:

$$\varpi = \sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} \cdot \sqrt{2 \cdot 1} \cdot 12 \cdot 20,37 \cdot 10^{-3}$$

	$\varpi = 1,15 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м}^3$ Вычислим модуль вектора Умова - Пойтинга (плотность потока энергии): $S = EH$ Подставим численные значения и получим: $S = 12 \cdot 20,37 \cdot 10^{-3} = 0,244 (\text{Вт/м}^2)$
Найти: $v - ?$ $f - ?$ $H_0 - ?$ $\varpi - ?$ $S - ?$	Ответ: $v = 2,13 \cdot 10^8 (\text{м/с})$ $f = 0,484 \cdot 10^{15} (\text{Гц})$ $H_0 = 20,37 \cdot 10^{-3} (\text{А/м})$ $\varpi = 1,15 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м}^3$ $S = 0,244 (\text{Вт/м}^2)$

Остальные варианты аналогичны вариантам представленным выше. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

5.3 Задачи для самостоятельной работы.

Задача 20

Плоская электромагнитная волна распространяется в однородной и изотропной среде с диэлектрической проницаемостью равной ε и $\mu=1$. Амплитуда напряжённости электрического поля волны равна E_0 . Длина волны равна λ . Частота электромагнитной волны равна f . Фазовая скорость волны равна v . Напряжённость магнитного поля равна H_0 . Объёмная плотность энергии электромагнитной волны равна ϖ . Модуль вектора Умова – Пойтинга равен S . Волна падает в течении времени t на поверхность площадью s , в итоге на поверхность попадает энергия W .

Определить неизвестную физическую величину, в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 20):

Таблица 20 - численных значений физических величин для задачи 20

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε	2,4	2	2,8	3,2	4,2	7	1,6	1,7	1,5	2,2
$E_0, \text{В/м}$	12	*	20	*	40	*	10	*	15	*
$\lambda, \text{нм}$	440	*	720	*	650	*	380	*	400	*
$f, \text{ТГц}$	*	500	*	720	*	400	*	650	*	450
$v, \text{м/с}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$H_0, \text{мА/м}$	*	10	*	15	*	20	*	25	*	30
$\varpi, \text{Дж/м}^3$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$S, \text{Вт./м}^2$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$t, \text{мин}$	2	5	8	10	30	20	4	12	30	50
$W, \text{Дж}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Заключение

Учебно-методическое пособие состоит из введения, двух разделов, заключения, приложений и списка литературы.

Каждый раздел в свою очередь разделён на несколько подразделов. Каждый из подразделов, в свою очередь делится на три основных части.

Первая часть каждого подраздела представляет из себя минимально необходимую подборку основных понятий, законов и формул, относящихся к изучаемой теме.

Вторая часть раздела включает в себя подробное решение нескольких вариантов многовариантной задачи с подробным выводом рабочей формулы и примером расчёта численного значения ответа. При этом отметим, что в целях экономии места во всех примерах приведены расчёты 1-2 вариантов, а не всех 5 – 10 возможных вариантов. Те варианты, которые не разобраны в примере решения учащимся следует решить самостоятельно.

Третья часть раздела представляет собой многовариантные задачи для самостоятельного решения. Число задач для самостоятельного решения в каждом разделе равно 2, но каждая задача представляет собой примерно 10 разных задач, поэтому общий объём заданий для самостоятельной работы учащихся получается значительным.

Примеры решения задач не ставят своей целью научить решению задач по физике. Это связано с тем, что научить решению задач по физике невозможно. Возможно только научиться решать задачи по физике при выполнении того условия, что учащийся будет самостоятельно решать задачи. При решении задач следует придерживаться некоторых общеизвестных правил:

1) Ознакомиться с приведёнными в начале раздела основными формулами и примерами решения задач

2) Несколько раз прочитать текст задачи и постараться вникнуть в её физический смысл. При необходимости полезно сделать схематический чертёж, например, направление движения тела, векторные величины, характеризующие это движение

3) Подумать, какие физические законы можно применить при решении данной задачи. Выяснить возможность применения законов сохранения.

4) Задачу следует вначале решить в общем виде, то есть получить алгебраическое выражение, содержащее буквенные обозначения физических величин, заданных в условии задачи, и буквенные обозначения постоянных.

5) Произвести проверку совпадения единиц измерения левой и правой части равенства.

6) Перед вычислением следует выразить все величины в единицах СИ.

7) Вычисления выполняют с точностью до трёх значащих цифр. С такой точностью заданы все физические величины в задачах и физические

постоянные в таблицах. Как правило, вычисления выполняют с четырьмя значащими цифрами, а конечный результат округляют до трёх.

3. Приложения.

Таблица ПЗ.1

Плотность газов при нормальных условиях (кг/м³), (при 0⁰С и 101,3 нПа)

Азот	1,25	Двуокись углерода	1,47
Аммиак	0,77	Кислород	1,98
Аргон	1,78	Окись углерода	1,25
Водород	0,09	Пропан	2,2
Воздух	1,29	Светильный газ	0,55
Гелий	0,179	Хлор	3,22

Таблица ПЗ.2. Фундаментальные физические константы

Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Элементарный заряд	$e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Удельный заряд электрона	$e/m = -1,7588047(49) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda = 2,4263089(40) \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,274078(36) \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Ядерный магнетон	$\mu_{\text{яд}} = 5,050824(20) \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$
Объем моля идеального газа при нормальных условиях ($T_0 = 273,15 \text{ К}$, $p_0 = 101325 \text{ Па}$)	$0,02241383(70) \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045(31) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662(44) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/ К}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31441(26) \text{ Дж/ моль} \cdot \text{ К}$

Постоянная Стефана -Больцмана	$\sigma = 5,67032(71) \cdot 10^{-8} \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}^4$
Гравитационная постоянная	$\gamma = 6,6720(41) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/ \text{кг}^2$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/ м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854187 (7) \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Ридберга	$R = 1,097373177(83) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Постоянная излучения (первая)	$c_1 = 3,741832(20) \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$
Постоянная излучения (вторая)	$c_2 = 0,01438786(45) \text{ м} \cdot \text{К}$
Первый Боровский радиус	$a_0 = 0,52917706(44) \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Скорость света в вакууме	$c = 299792458 \text{ м/с}$
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2 = 939,5731(27) \text{ МэВ}$
Энергия покоя протона	$m_p c^2 = 938,2796(27) \text{ МэВ}$
Энергия покоя электрона	$m_e c^2 = 0,5110034(14) \text{ МэВ}$
Энергия, соответствующая 1 а.е.м.	$931,5016(26) \text{ МэВ}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e = 0,9109534(47) \cdot 10^{-30} \text{ кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Таблица ПЗ.4 Удельное сопротивление ρ проводников, температурный коэффициент α

Проводники	ρ , нОм · м	α , K^{-1}
Алюминий	26	4,5
Вольфрам	50	4,8
Графит	$3,9 \cdot 10^3$	-0,8
Железо	98	6,2
Золото	20	4,0
Медь	17	4,3
Свинец	190	4,2
Серебро	15	4,1

Таблица ПЗ.5 Удельное сопротивление изоляторов.

Изоляторы	ρ , Ом· м
Бумага	10^{10}
Парафин	10^{15}
Слюда	10^{13}
Фарфор	10^{13}
Шеллак	10^{14}
Эбонит	10^{14}
Янтарь	10^{17}

Таблица ПЗ.6 Диэлектрическая проницаемость среды

Вещество	ϵ
Вакуум	1,0
Воск	7,8
Воздух	1,000594
Керосин	2
Парафин	2,0
Силиконовое масло	2,2...2,8
Янтарь	2,2...2,9
Полиэтилен	2,3
Полистирол	2,3...2,5
Каучук	2,5...3,0
Эбонит	3
Плексиглас	3...4
Бакелит	3...5
Пертинакс	4...6
Сегнетовая соль	10000
Слюда	7
Фарфор	5
Вода дистиллированная	81
Игелит	5
Полихлорвинил	5
Стекло	7
Ацетон	21,4
Спирт этиловый	25,1
Спирт метиловый	33,5
Гетинакс	3,5...6
Керамика специальная	до 10^4

Таблица ПЗ.7 Элементы периодической системы

(Z - порядковый номер элемента; A - относительная атомная масса химического элемента (округленные значения))

Z	Элемент	Символ	A
1	Водород	H	1,01
2	Гелий	He	4,00
3	Литий	Li	6,94
4	Бериллий	Be	9,01
5	Бор	B	10,8
6	Углерод	C	12,00
7	Азот	N	14,0
8	Кислород	O	16,0
9	Фтор	F	19,0
10	Неон	Ne	20,2
11	Натрий	Na	23,0
12	Магний	Mg	24,4
13	Алюминий	Al	27,0
14	Кремний	Si	28,1
15	Фосфор	P	31,0
16	Сера	S	32,1
17	Хлор	Cl	35,5
18	Аргон	Ar	40,0
19	Калий	K	39,1
20	Кальций	Ca	40,1
21	Скандий	Sc	45,0
22	Титан	Ti	47,9
23	Ванадий	V	51,0
24	Хром	Cr	52,0
25	Марганец	Mn	54,9
26	Железо	Fe	55,9
27	Кобальт	Co	58,9
28	Никель	Ni	58,7
29	Медь	Cu	63,5
30	Цинк	Zn	65,4
31	Галлий	Ga	69,7
32	Германий	Ge	72,6
33	Мышьяк	As	74,9
34	Селен	Se	79,0
35	Бром	Br	79,9
36	Криптон	Kr	83,8

Продолжение Таблицы ПЗ.7 Элементы периодической системы

Z	Элемент	Символ	A
52	Теллур	Te	128
53	Йод	J	127
54	Ксенон	Xe	131
55	Цезий	Cs	133
56	Барий	Ba	137
57	Лантан	La	139
58	Церий	Ce	140
59	Празеодим	Pr	141
60	Неодим	Nd	144
61	Прометий	Pm	145
62	Самарий	Sm	150
63	Европий	Eu	152
64	Гадолиний	Gd	157
65	Тербий	Tb	159
66	Диспрозий	Dy	163
67	Гольмий	Ho	165
68	Эрбий	Er	167
69	Тулий	Tu	169
70	Иттербий	Yb	173
71	Лютеций	Lu	175
72	Гафний	Hf	178
73	Тантал	Ta	181
74	Вольфрам	W	184
75	Рений	Re	186
76	Осмий	Os	190
77	Ир		192
78	Платина	Pl	195
79	Золото	Au	197
80	Ртуть	Hg	201
81	Таллий	Tl	204
82	Свинец	Pb	207
83	Висмут	Bi	209
84	Полоний	Po	210
85	Астат	At	210
86	Радон	Rn	222
87	Франций	Fr	223

Продолжение Таблицы ПЗ.7 Элементы периодической системы

37	Рубидий	Rb	85,5
38	Стронций	Sr	87,6
39	Иттрий	Y	88,9
40	Цирконий	Zr	91,2
41	Ниобий	Nb	92,9
42	Молибден	Mo	96,0
43	Технеций	Tc	99
44	Рутений	Ru	101
45	Родий	Rh	103
46	Палладий	Pd	106
47	Серебро	Ag	108
48	Кадмий	Cd	112
49	Индий	In	115
50	Олово	Sn	119
51	Сурьма	Sb	122
88	Радий	Ra	226
89	Актиний	Ac	227
90	Торий	Th	232
91	Протактиний	Pa	231
92	Уран	U	238
93	Нептуний	Np	237
94	Плутоний	Pu	244
95	Амереций	Am	243
96	Кюрий	Cm	247
97	Берклий	Bk	249
98	Калифорний	Cf	249
99	Эйнштейний	Es	254
100	Фермий	Fm	262
101	Менделевий	Md	259

Таблица ПЗ.8 Десятичные приставки к названиям единиц

Т – тера (10^{12})	д – деци (10^{-1})	н – нано (10^{-9})
Г – гига (10^9)	с – санти (10^{-2})	п – пико (10^{-12})
М – мега (10^6)	м – милли (10^{-3})	ф – фемто (10^{-14})
к – кило (10^3)	мк – микро (10^{-6})	а – атто (10^{-18})

4.Список использованных источников

- 1) Детлаф А.А. Яворский Б.М. Курс физики.-М: Высшая школа, 1989.
- 2) Трофимова Е.Ф. Курс физики. –М:Высшая школа, 2001
- 3) Калашников Н.П. Основы физики в 2-х томах.-М: Дрофа:, 2004
- 4) Калашников Н.П. Смондырев М.А. Основы физики. Том 1 – М: Дрофа, 2003
- 5) Поезжалов В.М. Мищенко А.В. Справочно-методическое пособие для подготовки к тестированию по общей физике: Костанай – КГУ им. А. Байтурсынова, 2007
- 6) Ремизов А.Н. Потапенко А.Я. Курс физики – М: Дрофа, 2004
- 7) Грабовский Р.И. Курс физики – СПб: Лань 2005
- 8) Савельев И.В. Курс физики Том 1 – М: Наука, 1989
- 9) Курс физики /под ред. Лозовского В.Н./ СПб –М-Краснодар:Лань, 2003
- 10) Чертов А.Г. Воробьев А.А. Задачник по физике – М:Наука, 1990
- 11) Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М:Наука, 1990
- 12) Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. (для вузов) М: Мир и образование, ОНИКС 21 век, 2002.