

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И.РАЗЗАКОВА**

**ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА И ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
имени академика У. АСАНАЛИЕВА**

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.
КОЛЕБАНИЕ И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

**МЕХАНИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И
ВОЛНЫ.
ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

КУРС ЛЕКЦИЙ С ПРИМЕРАМИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Бишкек 2011

«Рассмотрено»
на заседании кафедры
«Техническая физика»

«Одобрено»
Методическим советом
ИГД и ГТ им. акад. У.Асаналиева

Рецензент к.ф.-м.н., доцент Усенканов Дж.О.

Составитель к.т.н., доцент БАЙБОСУНОВ М.Б.

Электричество и магнетизм. Колебание и волновая оптика. Механические, электромагнитные колебания и волны. Волновая оптика. Курс лекций с примерами решения задач / КГТУ им. И.Раззакова; сост.: М.Б.Байбосунов. – Б.: ИЦ «Текник», 2011. – 92 с.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА (6ч)

§ 11. Электрическое поле в вакууме

1. Электрические свойства тел. Электрический заряд.

На поверхности многих диэлектриков(янтаря, стекла, эбонита пластмассы) при трении возникает электрический заряд. При этом поверхность либо теряет, либо приобретает электроны. При недостатке электронов тело заряжается положительно.

При избытке электронов тело заряжается отрицательно. При этом электризуются оба тела и между электрически заряженными телами действуют силы. Электрический заряд – это мера свойств заряженных тел определенным образом взаимодействовать друг с другом.

2. Одноименно заряженные тела отталкиваются разноименно заряженные тела притягиваются. По этой причине у проводников заряд располагается только на поверхности. Внутри проводников нет ни зарядов, ни поля явления, в которых тела приобретают свойства притягивать другие тела, называют электризацией.

3. Заряд распределяется по поверхности тела неравномерно. В сильно искривлённых местах плотность заряда больше. На остриях плотность заряда бывает настолько большей, что происходит ионизация воздуха и заряд стекает – «эффект острия».

4. Для обнаружения и измерения величины заряда служат электрометры. Они содержат обычно две легкие металлические полоски ; одна из них закреплена неподвижно, а вторая - подвижная.

Если прикоснуться к электromетру заряженным телом, на обеих полосках возникнут одноименным заряды, которые отталкиваются друг от друга, и подвижная полоска отклоняется.

5. Все электрические заряды состоят из элементарных зарядов; электрический заряд электрона и протона по абсолютному значению равен

$$l = \pm 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ}$$

Масса протона и электрона соответственно равны

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \qquad m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

6. Закон сохранения электрического заряда. При всех явлениях, связанных с перераспределением электрических зарядов в изолированной системе взаимодействующих тел, алгебраическая сумма электрических зарядов сохраняется постоянной. Поскольку материя неуничтожима имеет место закон сохранения электрических зарядов $\sum q_i = \text{const}$.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что такое электрический заряд?
2. Чем отличаются друг от друга электрические заряды?
3. Какой заряд называют элементарным?
4. Как формулируют закон сохранения электрических зарядов?
5. Когда тело является электрически нейтральным? Когда заряженным?
6. В чем состоит явление электризации

§ 1.2 Взаимодействие заряженных тел. Закон Кулона

1. Закон, которому подчиняется сила взаимодействия точечных зарядов, был установлен экспериментально в 1785 г французским физиком и военным инженером Кулоном.

2. Точечным зарядом называется заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других тел, несущих электрический заряд.

Сила, действующая между двумя заряженными частицами, пропорционально произведению зарядов q_1 и q_2 обратно пропорционально квадрату расстояния r между ними (рис. 1. 1)

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1. 1)$$

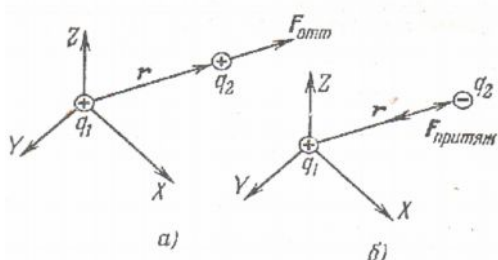


Рис.1.1.

где k_0 коэффициент пропорциональности, определяемый из эксперимента из закона Кулона в системе СИ:

$$k_0 = \frac{Fr^2}{q_1 q_2} = 9 \cdot 10^9 \frac{НМ^2}{Кл^2}.$$

3. В СИ коэффициент пропорциональности в законе Кулона не равен единица, его записывают в виде

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1. 2)$$

Следовательно, закон Кулона в СИ имеет вид:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} \quad (\text{в веществе}), \quad (1. 3)$$

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (\text{в вакууме; } \epsilon = 1) \quad (1. 4)$$

где ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды: в воздухе $\epsilon = 1$, Керосине $\epsilon = 2$, в масле $\epsilon = 5$, стекле $\epsilon = 5 - 15$, воде $\epsilon = 81$ и. т. д.

Произведение ϵ данного вещества и ϵ_0 называется абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ_a этого вещества: $\epsilon_a = \epsilon\epsilon_0$.

4. Значение электрической постоянной, из (2) имеем

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{Кл^2}{Н \cdot М^2} \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл^2}{Н \cdot М^2} \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл^2}{Дж \cdot М} \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл}{В \cdot М} \left(\frac{\Phi}{М} \right)$$

Вопросы для закрепление пройденного

1. Какой заряд называют точечным?
2. Как формулируют и записывают в общем виде закон Кулона для взаимодействия зарядов в вакууме?
3. Как записывают в общем виде закон Кулона для взаимодействия зарядов в веществе?
4. Почему коэффициент прямо пропорциональная в законе Кулона в СИ не равен единице? Как он выражается?
5. Что такое абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества и чему равен?
6. Чему равна электрическая постоянная?

§ 1.3. Электрическое поле . Напряженность электрического поля

1. В пространстве вокруг каждого электрического заряда существует **электрическое поле**. Электрическим полем называют вид материи, посредством которой происходит взаимодействие электрических зарядов.

Электрическое поле неподвижных электрических зарядов называют **электростатическим**

2. Силовой характеристикой электрического поля в данной точке является векторная величина \vec{E} напряженности поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.5)$$

откуда $\vec{F} = q\vec{E}$

Из (5) видно, что напряженность электрического поля в данной точке численно равна силе, с которой поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку.

3. Единицу напряженности электрического поля устанавливают из формулы (5).

$$\text{В СИ: } 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{М}}{\text{Кл} \cdot \text{М}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{КлМ}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{М}}$$

4. Электрическое поле изображают с помощью силовых линий.

Силовой линией напряженности называют линию, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора электрической напряженности в этой точке. Линии напряженности электростатического поля обладают следующими свойствами:

- они являются незамкнутыми линиями; началом их считают положительный, а концом – отрицательный заряды;
 - в пространстве между электрическими зарядами линии напряженности нигде не перерываются;
 - через каждую точку электрического поля можно провести только одну линию напряженности, т. е. эти линии нигде не пересекаются друг с другом.
 - Линии напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям (в том числе и поверхности проводника, на котором электрические заряды находятся в равновесии).
- На (рис. 1. 2) даны примеры графического изображения различных электрических полей.

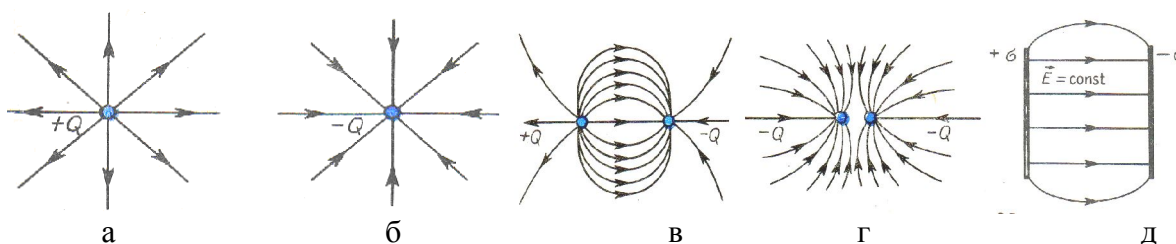


Рис. 1.2

5. На рис. 1. 2а показана поле уединенного точечного положительного заряда, на рис 1. 2б поле уединенного точечного отрицательного заряда, на рис. 1. 2в приведено поле двух точечных разноименных зарядов, на рис. 1. 2г поле двух точечных одноименных зарядов, на рис. 1. 2д поле плоского конденсатора, которые внутри конденсатора, вдали от краев его пластин, является однородным.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что такое электрическое поле?
2. Какое поле называют электростатическим?
3. Что называют напряженностью электрического поля?
4. Какая формула выражает сущность этого поля?

5. Установите единицу электрической напряженности в СИ.
6. Что называют линиями напряженности электрического поля? Какими свойствами **они** обладают?
7. Приведите примеры графического изображения электрических полей.

§ 1.4. Расчет электрических полей методом суперпозиции

1. До сих пор мы рассматривали силу, действующую на одно заряженное тело со стороны другого заряженного тела. Предположим теперь, что, кроме рассматриваемого тела, присутствует еще несколько заряженных тел.

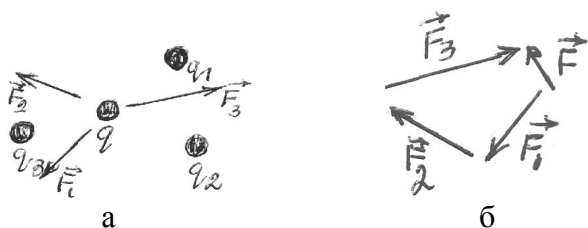


Рис. 1.3.

Какой будет в этом случае электростатическая сила, действующая на первое тело?

2. Для получения результирующей силы сложим векторно силы, действующие между каждой парой тел. На рис 1.3 на заряд q действует сила

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \quad (1.6)$$

это утверждение подтверждается принципом суперпозиции (наложения) для случая электростатических сил с равномерным распределением заряда, такие, как заряженный проводник или заряженная прямоугольная пластинка.

3. В этом случае

$$\vec{F} = \int d\vec{F} \quad (1.7)$$

где $d\vec{F}$ - сила, действующая со стороны отдельного элемента заряда.

На рис. 1. За - силы, действующие на заряд q со стороны зарядов q_1, q_2, q_3 ;

б) результирующая сила \vec{F} получается векторным сложением сил, действующих на заряд.

§ 1.5. Поток вектора

1. Рассмотрим в векторном поле \vec{E} элементарную поверхность $d\vec{s}$, в пределах которой \vec{E} можно считать постоянным по величине. В случае точечного заряда число силовых линий остается постоянным при любых значениях r .

2. Окружим заряд q воображаемой сферой радиусом, r_1 как показано на рис 1.4.

Силовые линии точечного заряда q пересекают воображаемую сферу радиусом r_1 .

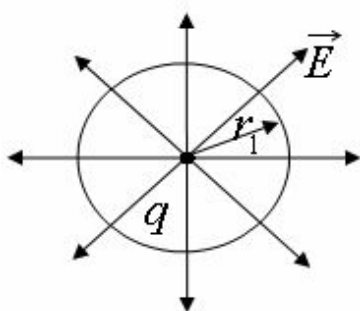


Рис. 1.4.

Поскольку площадь сферы равна $S_{сф} = 4\pi r_1^2$, число силовых линий, пересекающих эту сферу, равно произведению E на площадь сферы S : $\Phi = E \cdot S = E \cdot$

$$4\pi r_1^2 = \kappa_0 \frac{q}{r_1^2} \cdot 4\pi r_1^2 = 4\pi \kappa_0 q \quad (1.8)$$

так как

$$\Phi = \oint \vec{E} d\vec{S} = 4\pi \kappa_0 q \quad (1.9)$$

Это есть замкнутая поверхность любой формы.

§ 1.6. Теорема Гаусса-Остроградского

1. Предположим, что замкнутая поверхность охватывает два точечных заряда q_1 и q_2 (рис 1.5)



Рис. 1.5.

Полное число линий, пересекающих эту поверхность, равно

$$\Phi_{\text{полк}} = \oint \vec{E} d\vec{S} = \oint (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) d\vec{S} = \oint \vec{E}_1 d\vec{S} + \oint \vec{E}_2 d\vec{S} \quad (1.10)$$

В соответствии (9) имеем $\oint \vec{E} d\vec{S} = 4\pi\kappa_0 q_1$, $\oint \vec{E} d\vec{S} = 4\pi\kappa_0 q_2$

Следовательно:

$$\Phi_{\text{полк}} = 4\pi\kappa_0 q_1 + 4\pi\kappa_0 q_2 = 4\pi\kappa_0 (q_1 + q_2) \quad (1.11)$$

Итак, в случае двух точечных зарядов полное число силовых линий, пересекающих замкнутую поверхность, равно произведению $4\pi\kappa_0$ на величину полного заряда внутри этой поверхности.

2. Обобщая это, на случай, когда внутри замкнутой поверхности имеет n точечных зарядов, можно записать

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = 4\pi\kappa_0 q_{\text{полн}} \quad (1.12)$$

где q_n – есть полный заряд внутри замкнутой поверхности S . Формула (12) есть теорема Гаусса – Остроградского: Число силовых линий пересекающих замкнутую поверхность равно произведено $4\pi\kappa_0$ на величину полного заряда внутри этой поверхности.

§ 1.7 Работа сил электростатического поля

1. Под влиянием сил электрического взаимодействия заряженные тела могут перемещаться. При этом совершается механическая работа.

Работа сил электрического поля заряды q при перемещении точечного заряда q' между точками В и С в системе СИ равно:

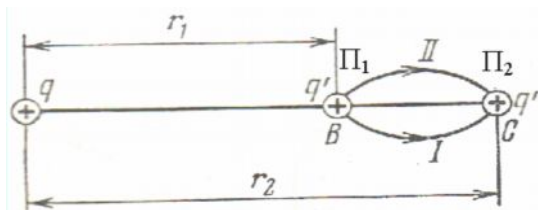


Рис. 1.6.

$$A = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.13)$$

где r_1 и r_2 расстояния точек В и С от заряда q (рис.1.6)

где показаны I и II формы пути перемещение точечного заряда q' из точки потенциальной энергией Π_1 в точку потенциальной энергии Π_2 .

2. Работ по перемещению заряда из одной точки электростатического поля в другую не зависит от

формы пути (смотри формулу 13), а зависит лишь от начального и конечного положений заряда (свойства потенциальности электрических сил) Потенциальная энергия отталкивания одноименных зарядов положительна и увеличивается, если заряды приближаются друг к другу.

Потенциальная энергия притяжения разноименных зарядов отрицательна. Потенциальная энергия в СИ:

$$\Pi = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (1.14)$$

Вопросы для закрепление пройденного

1. Докажите, что работа сил электрического поля не зависит от траектории движения поле электрического заряда.
2. Какие поля называют потенциальными? Относится ли к ним электрическое поле?

§ 1. 8. Потенциал электростатического поля

1. Энергетической характеристикой электростатического поля является его потенциал. Потенциалом поля в данной точке называется скалярная величина (имеющее только числовое значение), численно равная потенциальной энергии (энергии взаимодействия или энергии взаимного расположения) Π единичного положительного заряда, помещенного в эту точку:

$$\varphi = \frac{\Pi}{q} \quad (1. 15)$$

откуда $\Pi = q\varphi$.

2. Работа по перемещению заряда q из точки 1 в точку 2 равна:

$$A = \Pi_1 - \Pi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1. 16)$$

$$\text{откуда } \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \quad (1. 17)$$

Единица потенциала в системе СИ вольт (В)

$$[\varphi_1 - \varphi_2] = \left[\frac{A}{q} \right] = \left(\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right) = (\text{В})$$

3. Заряд электрона (элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$) при движении её между точками поля с разностью потенциалов в 1В то: $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1\text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Электрон вольт есть энергия, приобретенная частицей, несущей на себе элементарный заряд.

4. Существует еще один метод изображения электростатических полей- метод эквипотенциальных поверхностей. Эквипотенциальной поверхностью называется поверхность равного потенциала (поверхность одинакового потенциала). Если источником поля является точечный заряд $+q$, на рис 1.7

изображено плоское сечение этой системы эквипотенциальных поверхностей; штрихом

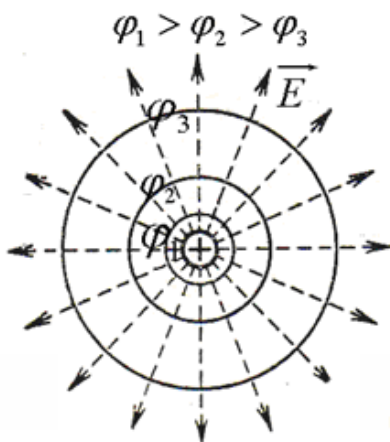


Рис. 1.7.

показаны силовые линии напряженности поля \vec{E} , и потенциалов φ_1, φ_2 и φ_3 . Как видно из рис, направление силовой линии в каждой точке поля нормально эквипотенциальной

поверхности. Связь между \vec{E} и φ выражается формулой

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi \quad (1.18)$$

Которая указывает о том, что напряженность электростатического поля направлен в сторону убывания потенциала т. е. $\varphi_3 < \varphi_2 < \varphi_1$

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что называют потенциалом электростатического поля?
2. По какой формуле находят разность потенциалов между двумя точками электростатического поля?
3. Выведите единицу потенциала в СИ и сформулируйте определение этой единицы.

§ 1.9. Электрическое поле в веществе

1. Вещества, которые не проводят электрического тока, называется диэлектриками. К ним относятся некоторые твердые вещества (напр. стекло, фарфор и др.) жидкости (химически чистая вода) и газы (H_2 , N_2 и др).

2. Молекулы диэлектрика создают электрическое поле, эквивалентное полю электрического диполя с электрическим моментом \vec{P}_l равным $\vec{P}_l = q\vec{l}$ (1.19)

Электрическим диполям называется система из двух разноименных точечных зарядов q равных по величине и находящихся на расстоянии \vec{l} друг от друга (рис. 1.8)

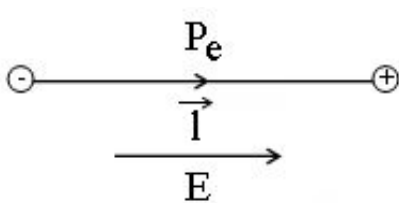


Рис. 1.8.

Диполь характеризуется векторной величиной \vec{P}_l называемой электрическим моментом диполя. Причем положительным направлением \vec{P}_l считается направление от отрицательного к положительному заряду.

3. Если диэлектрик помещается во внешнее электрическое поле, то в молекуле (атоме) диэлектрика возникает индуцированный (наведенный) дипольный электрический момент пропорциональной напряженности \vec{E} электрического поля; в системе СИ:

$$\vec{P}_l = \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.20)$$

Под действием внешнего электрического поля диэлектрик поляризуется (результатирующий дипольный момент становится отличным от нуля).

§ 1.10 Вектор электрического смещения

1. Электрическим смещением(электрической индукцией) называется величина, определяемая соотношением

$$D = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \quad (1.21)$$

2. С учетом формулой $\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon R^2}$ формула (21) примет вид; по модулю:

$$D = \frac{q}{4\pi R^2} \quad (1.22)$$

В система СИ $[D] = \left[\frac{q}{4\pi R} \right] = \left(\frac{Кл}{м^2} \right)$

§ 1.11 Сегнетоэлектрики

1. Сегнетоэлектриками называется группа кристаллических диэлектриков, получивших свое название по первому исследованному веществу типа – сегнетовой соли. Примером сегнетоэлектрика является также титанит бария $BaTiO_3$.

2. сегнетоэлектрики отличаются от остальных диэлектриков следующими особенностями:

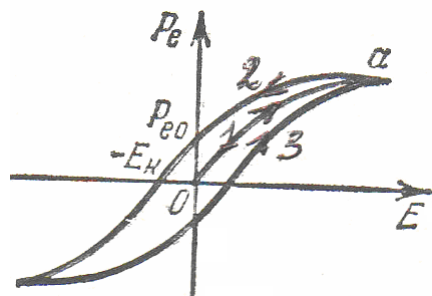


Рис. 1.9.

у диэлектриков ϵ составляет несколько единиц, достигая в нескольких десятках $\epsilon_{\text{воды}} = 81$.

- у сегнетоэлектриков бывает порядка нескольких тысяч $\sim 10^5$.

- зависимость \vec{P}_l от \vec{E} не является линейной кривой изображенной как на рис. 1.9.

Следовательно, ϵ зависит от \vec{E} (ϵ относительная диэлектрическая проницаемость среды).

При изменениях напряженности внешнего поля \vec{E}

значения поляризованности диэлектрика \vec{P}_l (а следовательно вектор электрического смещения \vec{D}) отстают от напряженности поля \vec{E} это явление называется гистерезисом (от греческого “Гистерезис” – запаздывание причины от следствия) см рис. 1.9

При первоначальном включении поля \vec{E} поляризованность диэлектрика \vec{P}_l растет с увеличением \vec{E} в соответствии с ветвью 1 кривой.

Уменьшение \vec{P}_l происходит с уменьшением \vec{E} по ветви 2.

При обращении $\vec{E}=0$ в нуль вещество сохраняет поляризованности \vec{P}_l называемое остаточной поляризованностью. Только под действием противоположно направленного поля $-\vec{E}_k, \vec{P}_l \rightarrow 0$ становится равной нулю $\vec{P}_l=0$. Это значение \vec{E}_k напряженности внешнего поля называется коэрцитивной силой. При дальнейшем изменении \vec{E} получается ветвь 3 поля гистерезиса и т.д.

3. Для каждого сегнетоэлектрика имеется определенная температура, при которой вещество утрачивает необычные свойства и становится нормальным диэлектриком сегнетовой соли имеет две точки Кюри: -15°C и $+22,5^\circ\text{C}$ и лишь при температуре ниже -15°C и выше $+22,5^\circ\text{C}$ электрические свойства сегнетовой соли обычные.

§ 1. 12. Проводники в электрическом поле

1. Проводниками называются вещества, в которых может происходить упорядоченное перемещение электрических зарядов т.е. осуществляется электрический ток. Проводниками являются металлы, водные растворы солей, кислот и др, ионизированные газы (отрыва от их атомов или молекул электронов). Наружные электроны оторванные от атома(валентные электроны) металла становятся электронами проводимости.

2. Если внутри проводника имеется полость, то в этой полости напряженность электростатического поля равна нулю и (защищена) экранирована от внешних электростатических полей. На этом основана электростатическая защита: если прибор окружен замкнутой металлической поверхностью то никакие внешние поля на этот прибор действовать не может.

3. Физическая величина измеряемая отношением заряда q проводника к его потенциалу ϕ называется емкостью (емкостью) уединенного проводника:

$$C = \frac{q}{\phi} \quad (1. 23)$$

Уединенным называется проводник находящийся вдали от заряженных тел и других проводников.

4. Потенциал заряженного шара радиуса R и зарядом q :

$$\varphi_m = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R} \quad (1.24)$$

в СИ.

Сопоставив (1.23) с (1.24) найдем, что емкость уединенного шара

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R \quad (21). \text{ в СИ}$$

Емкость проводника зависит от размеров и геометрической формы, но не зависит от материала проводника. За единицу емкости принимают: $[c] = \left[\frac{q}{\varphi} \right] = \left(\frac{Кл}{В} \right) = \phi$ в СИ емкость фарада (ф) очень большая единица, например, емкостью в 1 ф обладал бы уединенный шар радиуса $R = 9 \cdot 10^9 \text{ м}$ т.е. в 1500 раз большего радиуса Земли ($R_3 = 6400 \text{ км}$). Поэтому на практике пользуются единицами: Миллифарада (мф), микрофараде (мкф), нанофарада (нф), пикофарада (пф): $1 \text{ мф} = 10^{-3} \phi$, $1 \text{ мкф} = 10^{-6} \phi$, $1 \text{ нф} = 10^{-9} \phi$, $1 \text{ пф} = 10^{-12} \phi$.

§ 1.13. Конденсаторы

1. Конденсатор состоит из двух проводников, заряженных разноименно равными по абсолютному значению зарядами находящимися на небольшом расстоянии друг от друга. Конденсатор служит накопителями электрической энергии. По этому обкладкам (пластинам) придают форму, чтобы поле создаваемое накапливаемыми на них зарядами, было сосредоточено внутри конденсатора.

Конденсаторы бывают плоские (рис. 1.10а) цилиндрические (рис. 1.10 б) и сферические (рис. 1.10 в).

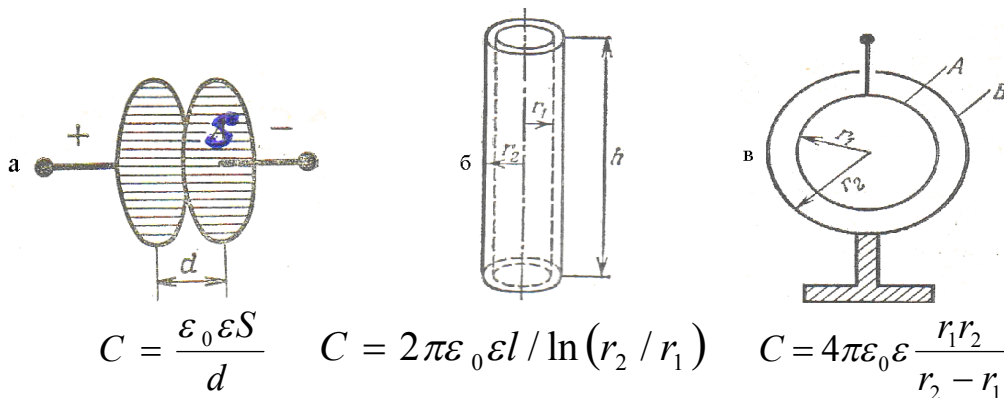


Рис. 1.10.

3. Основной характеристикой конденсатора является его емкость, под которой понимают величину пропорциональную заряду q и обратно пропорциональную разности потенциалов или напряжению между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{u} \quad (1.25)$$

$$u = \frac{q}{c}$$

4. При зарядке конденсатора можно сообщить заряд, одной из обкладок а другую

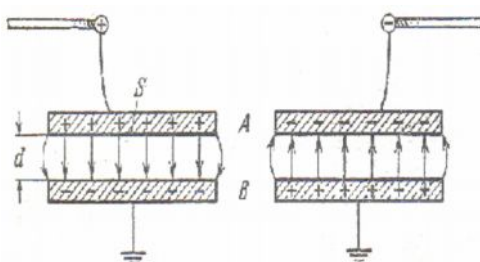


Рис. 1.11.

обкладку заземлить (рис. 1.11) Тогда на заземленной обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равной по значению заряду, сообщенному первой обкладке. В землю уйдет заряд того знака, которым заряжена первая обкладка.

§ 1. 14. Соединение конденсаторов

1. Увеличение емкости достигается параллельным соединением конденсаторов в батарею:

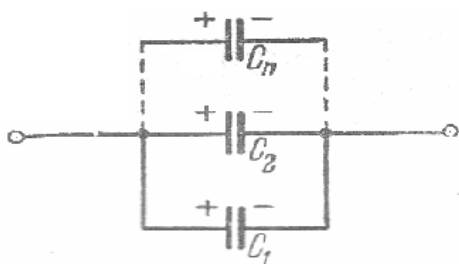


Рис.1. 12.

все положительно заряженные обкладки в одну точку потенциалом φ_1 , а все отрицательно заряженные пластины в другую точку потенциалом φ_2 . Полная емкость батареи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов (рис. 1. 12)

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (1. 26)$$

Полная емкость n параллельно соединенных конденсаторов: $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

Полная емкость параллельно соединенных n

одинаковых емкостью C_1 конденсаторов: $c = n \cdot c_1$.

2. При последовательном соединении конденсаторов соединяются в батарею их разноименные обкладки (рис 1. 13).



Рис.1. 13.

При этом величина обратная полной емкости, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов (рис. 1. 13):

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} \quad (1. 27)$$

Общая емкость батареи всегда меньше, чем наименьшая емкость конденсатора, входящего в батарею. При последовательном соединении n конденсаторов: $\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n}$ При

последовательном соединении n одинаковых конденсаторов емкостью C_1 каждой: $c = \frac{c_1}{n}$

§ 1. 15. Энергия электрического поля

1. Собственная энергия заряженного проводника:

$$W_{\text{пров}} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2c} = \frac{c\varphi^2}{2} \quad (1. 28)$$

из $W_c = \frac{q\varphi}{2}$ получим с учетом $c = \frac{q}{\varphi} \Rightarrow \varphi = \frac{q}{c} : \left(\frac{q^2}{2c} \right)$

из $W_c = \frac{q\varphi}{2}$ получим с учетом $c = \frac{q}{\varphi} \Rightarrow q = c\varphi : \left(\frac{c\varphi^2}{2} \right)$;

2. Аналогично, повторяя ход вывода приведенного выше для проводника получим выражение для конденсатора:

$$W_{\text{конд}} = \frac{qu}{2} = \frac{q^2}{2c} = \frac{cu^2}{2} \quad (1. 29)$$

студентам решить самостоятельно и получить формулу (29).

3. Энергия однородного электрического поля сосредоточенного в объеме V в системе СИ:

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V \quad (1. 30)$$

4. объемная плотность энергии(энергия электростатического поля, приходящаяся на единицу объема).

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} \quad (1.31)$$

или с учетом $D = \varepsilon_0 \varepsilon E^2$

$$w = \frac{1}{2} ED \quad (1.32)$$

Вопросы для закрепление пройденного

1. Какие вещества являются проводниками. Приводите примеры.
2. Какие частицы являются носителями свободных зарядов в металлах?
3. Что называют электрической емкостью проводника? Установит и единицу электроемкости в СИ.
4. Что называют конденсатором? Для чего конденсатор служит?
5. Какие виды конденсаторы бывают и по какой формуле вычисляются их емкости?
6. Нарисуйте схемы последовательного и параллельного соединений конденсаторов в батареи?
7. Напишите энергии электрического поля?

Решение типовых задач

9. 2 Два точечных зарядов, находясь в воздухе ($\varepsilon = 1$) на расстоянии $r_1 = 20\text{см}$ друг от друга, взаимодействуют с некоторой силой. На каком расстоянии r_2 нужно поместить эти заряды в масле, чтобы получить ту же силу взаимодействия?

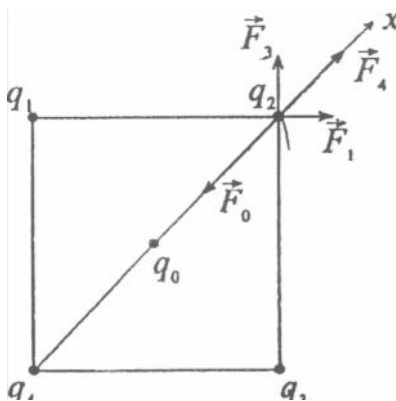
Решение:

Согласно закону Кулона два точечных заряда в воздухе взаимодействуют с силой $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_1 r_1^2}$ - (1), а в масле с такой же силой $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_2 r_2^2}$ - (2). Приравняв правые части

уравнений (1) и (2), найдем $r_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} r_1$. Диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_1 = 1$,

диэлектрическая проницаемость масла (таблица 14) $\varepsilon_2 = 5$. Подставив числовые значения, получим $r_2 = 8,94\text{см}$.

9. 10. В центр квадрата, в каждой вершине которого находится заряд $q = 2,33\text{ нКл}$, помещен отрицательный заряд q_0 . Найти этот заряд, если на каждый заряд q действует результирующая сила $F = 0$.



Решение:

Рассмотрим силы, действующие на любой из зарядов в вершинах, например, на заряд q_2 . Со стороны зарядов q_1, q_3, q_4 на него действуют силы \vec{F}_1, \vec{F}_3 и \vec{F}_4

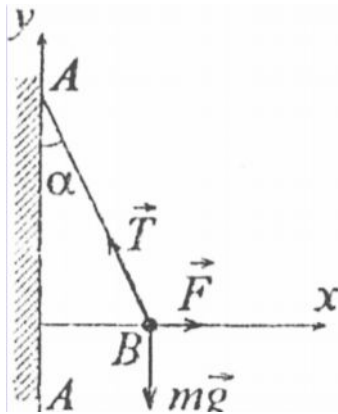
соответственно, причем $F_1 = F_3 = \frac{kq^2}{a^2}$, где $k = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0}$;

$F_4 = k \frac{q^2}{2a^2}$. Сила, действующая на заряд q_2 со стороны

заряда q_0 , равна $F_0 = \frac{2kq|q_0|}{a^2}$. Условие равновесия заряда q_2 : $\vec{F}_1 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_0 = 0$ - (1). В

проекции на ось x (1) имеет вид: $F_1 \cos 45^\circ + F_3 \cos 45^\circ + F_4 - F_0 = 0$, или $k \frac{q^2}{a^2} \sqrt{2} + k \frac{2q|q_0|}{a^2} = 0$. Отсюда находим $|q_0| = \frac{q}{4}(1 + 2\sqrt{2}) = 0,95q$; $q_0 = -2,23$ нКл.

9. 18. На рисунке AA – заряженная бесконечная плоскость с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 40$ мкКл/м² и B – одноименно заряженный шарик с массой $m = 1$ г - и зарядом $q = 1$ нКл. Какой угол α с плоскостью AA образует нить, на которой висит шарик?



Решение:

Заряженный шарик находится в электрическом поле плоскости AA. Напряженность поля $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}$. На шарик действуют три

силы: электростатическая сила \vec{F} , сила натяжения нити \vec{T} и сила тяжести $m\vec{g}$. Условие равновесия шарика $\vec{F} + \vec{T} + m\vec{g} = 0$ или в проекциях на ось x : $F - T \sin \alpha = 0$ - (1), на ось y : $T \cos \alpha - mg = 0$ - (2).

Электростатическая сила $F = Eq = \frac{q\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}$ - (3). Из (2) найдем

$T = \frac{mg}{\cos \alpha}$. Подставляя это выражение в (1), получим $F = mgtg\alpha$ - (4). Приравняв правые

части (3) и (4), найдем $\frac{q\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} = mgtg\alpha$, откуда $tg\alpha = \frac{q\sigma}{2\epsilon_0\epsilon mg}$; $tg\alpha = 0,23$; $\alpha = 13^\circ$.

9. 20 Найти силу F , действующую на заряд $q = 2$ СГС_q, если заряд помещен:

- на расстоянии $r = 2$ см от заряженной нити с линейной плотностью заряда $\tau = 0,2$ мкКл/м;
- в поле заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 20$ мкКл/м²;
- на расстоянии $r = 2$ см от поверхности заряженного шара с радиусом $R = 2$ см и поверхностной плотностью заряда $\sigma = 20$ мкКл/м². Диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 6$.

Решение:

Переведем единицы измерения заряда в СИ: $q = 2$ СГС_q $\approx 2 \cdot 3,336 \cdot 10^{-10}$ Кл.

а) Напряженность электрического поля заряженной нити $E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$, следовательно, на

заряд q действует электростатическая сила $F = Eq = \frac{\tau q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$; $F = 20,1$ мкН.

б) Аналогично для заряженной плоскости $F = \frac{\sigma q}{2\epsilon\epsilon_0} = 126$ мкН.

в) Напряженность электрического поля заряженного шара $E = \frac{q_{ш}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$, где заряд шара

$$q = \sigma S = \sigma 4\pi R^2. \text{ Тогда } E = \frac{\sigma R^2}{\epsilon\epsilon_0 r^2}, \text{ а сила, действующая на заряд, } F = \frac{q\sigma R^2}{\epsilon\epsilon_0 (r+R)^2} = 63 \text{ мкН}.$$

9. 26. С какой силой F_S на единицу площади отталкиваются две одноименно заряженные бесконечно протяженные плоскости? Поверхностная плотность заряда на плоскостях $\sigma = 0,3 \text{ мКл/м}^2$

Решение:

Напряженность поля бесконечной заряженной плоскости $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}$. С другой стороны,

$$E = \frac{F}{q}, \text{ где } q = \tau S. \text{ Приравняем } \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} = \frac{F}{\tau \cdot S}, \text{ отсюда сила, действующая на единицу}$$

$$\text{площади плоскости, } F_S = \frac{F}{S} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0\epsilon} = 5,1 \text{ Н/м}.$$

9. 28. В плоском горизонтально расположенном конденсаторе заряженная капелька ртути находится в равновесии при напряженности электрического поля $E = 60 \text{ кВ/м}$. Заряд капли $q = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ СГС}_q$. Найти радиус R капли.

Решение:

На капельку ртути в конденсаторе действует электростатическая сила \vec{F} (вверх) и сила тяжести $m\vec{g}$ (вниз), которые уравниваются друг друга, т. е. $\vec{F} + m\vec{g} = 0$ или $F = mg$.

Масса капли $m = \rho V = \frac{3}{4}\pi r^3 \rho$. Сила $\vec{F} = \vec{E}q$. Тогда $Eq = \rho \frac{3}{4}\pi r^3 g$, откуда

$$r = \sqrt[3]{\frac{3Eq}{4\rho\pi g}} = 0,44 \text{ мкм}$$

9. 42. Два шарика с зарядами $q_1 = 6,66 \text{ нКл}$ и $q_2 = 13,33 \text{ нКл}$ находятся на расстоянии $r_1 = 40 \text{ см}$. Какую работу A надо совершить, чтобы сблизить их до расстояния $r_2 = 25 \text{ см}$

Решение:

Энергия электростатического взаимодействия шариков $W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$. Для сближения

шариков нужно совершить работу $A = \Delta W = W_2 - W_1$. Поскольку $W_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1}$, а

$$W_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2}, \text{ то } A = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = 1,2 \text{ мкДж}.$$

9. 44. Найти потенциал φ точки поля, находящейся на расстоянии $r = 10 \text{ см}$ от центра заряженного шара радиусом $R = 1 \text{ см}$. Задачу решить, если:

- а) задана поверхностная плотность заряда на шаре $\sigma = 0,1 \text{ мкКл/м}^2$;
 б) задан потенциал шара $\varphi = 300 \text{ В}$.

Решение:

Имеем $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$ в СИ.

а) Поскольку $q = \sigma S = \sigma 4\pi R^2$, то $\varphi = \frac{4\pi\sigma R^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \frac{\sigma R^2}{\epsilon\epsilon_0 r}$; $\varphi = 11,3 \text{ В}$.

б) Потенциал шара $\varphi_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$, откуда $q = 4\pi\varphi_0\epsilon\epsilon_0 R$. Тогда $\varphi = \frac{4\pi\varphi_0\epsilon\epsilon_0 R}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \frac{\varphi_0 R}{r}$;
 $\varphi = 30 \text{ В}$.

9. 47. Найти скорость v электрона, прошедшего разность потенциалов U , равную: 1, 5, 10, 100, 1000 В.

Решение:

Работа по перемещению электрона из точки 1 в точку 2 равна $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot u$.

С другой стороны, работ A равна приращению его кинетической энергии $A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$.

Если $v_1 = 0$, то $A = \frac{mv_2^2}{2}$. Тогда $U = \frac{mv_2^2}{2e}$, где e – заряд электрона, m – его масса (см.

таблицу 3), откуда $v_2 = \sqrt{\frac{2Ue}{m}}$. Составим таблицу искомых значений.

U, В	1	5	10	100	1000
$v, 10^6 \text{ м/с}$	0,59	1,33	1,88	5,93	18,75

9. 52. Около заряженной бесконечно протяженной плоскости находится точечный заряд $q = 0,66 \text{ нКл}$. Заряд перемещается по линии напряженности поля на расстояние $\Delta r = 2 \text{ см}$; при этом совершается работа $A = 50 \text{ эрг}$. Найти поверхностную плотность заряда σ на плоскости.

Решение:

Переведем единицы измерения работы A в систему СИ: $A = 50 \text{ эрг} = 50 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$.

Напряженность поля бесконечно заряженной плоскости $E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$ - (1). Кроме того,

напряженность и потенциал однородного поля связаны соотношением $E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r}$ - (2).

Приравняв (1) и (2), получим $\frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r}$ - (3). Работа сил поля $A = qu = \frac{q\sigma\Delta r}{2\epsilon\epsilon_0}$, откуда

$$\sigma \frac{2A\epsilon\epsilon_0}{q\Delta r} = 6,7 \text{ мкКл/м}^2.$$

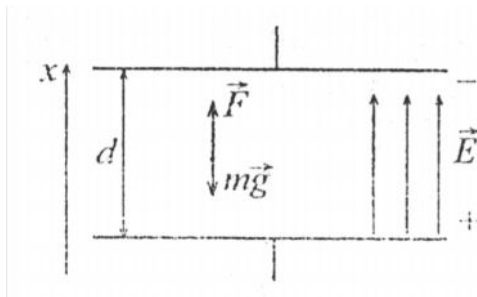
9.53. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора $U = 90\text{В}$. Площадь каждой пластины $S = 60\text{см}^2$, и заряд $q = 1\text{нКл}$. На каком расстоянии d друг от друга находятся пластины?

Решение:

Напряженность поля плоского конденсатора $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$ - (1). С другой стороны, $E = \frac{U}{d}$ - (2).

Приравняв (1) и (2), с учетом $\sigma = \frac{q}{S}$, получим $\frac{q}{S\epsilon\epsilon_0} = \frac{U}{d}$, откуда $d = \frac{US\epsilon\epsilon_0}{q} = 4,78\text{мм}$.

9. 54. Плоский конденсатор можно применить в качестве чувствительных микровесов. В плоском горизонтально расположенном конденсаторе, расстояние между пластинами которого $d = 3,84\text{мм}$, находится заряженная частица с зарядом $q = 1,44 \cdot 10^{-9}\text{КГС}_q$. Для того чтобы частица находилась в равновесии, между пластинами конденсатора, нужно было приложить разность потенциалов $U = 40\text{В}$. Найти массу m частицы.



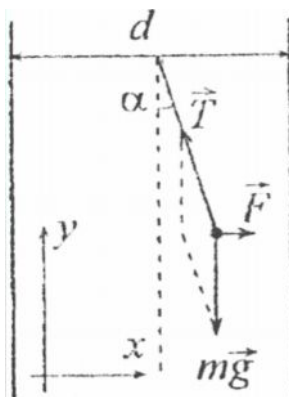
Решение:

Со стороны электрического поля на капельку действует сила $\vec{F} = \vec{E}q$, которая уравнивается силой тяжести $m\vec{g}$. Т. к. $\vec{E}q + m\vec{g} = 0$ или

$Eq = mg$. Напряженность поля плоского конденсатора $E = \frac{U}{d}$. Тогда $\frac{Uq}{d} = mg$, откуда

$$m = \frac{Uq}{d} = 5,1 \cdot 10^{-16}\text{кг}.$$

9. 59. Между двумя вертикальными пластинами, находящимися на расстоянии $d = 1\text{см}$ друг от друга, на нити висит заряженный бузиновый шарик массой $m = 0,1\text{г}$. После подачи на пластины разности потенциалов $U = 1\text{кВ}$ нить с шариком отклонилась на угол $\alpha = 10^\circ$. Найти заряд q шарика.



Решение:

На шарик действует сила электрического поля $\vec{F} = q\vec{E}_1$ - (1), сила натяжения нити \vec{T} и сила тяжести $m\vec{g}$. Условие равновесия $\vec{F} + m\vec{g} + \vec{T} = 0$. В проекциях на оси x и y соответственного $F - T \sin \alpha = 0$ - (2) и $T \cos \alpha - mg = 0$ - (3). Из (3)

$$T = \frac{mg}{\cos \alpha}, \text{ тогда из (2) } F = mg \cdot \text{tg} \alpha \text{ или, с учетом (1), } qE = mg \cdot \text{tg} \alpha -$$

$$(4). \text{ Напряженность поля плоского конденсатора } E = \frac{U}{d} - (5).$$

Поставляя (5) в (4), получим $\frac{qU}{d} = mg \cdot \text{tg} \alpha$, откуда $q = \frac{dmg \cdot \text{tg} \alpha}{U} = 1,73\text{нКл}$.

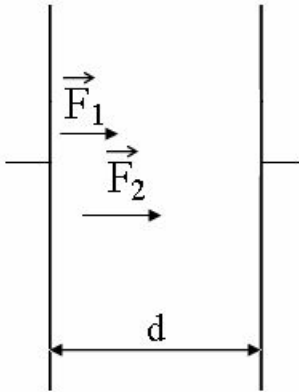
9. 60. Мыльный пузырь с зарядом $q = 222\text{нКл}$ находится в равновесии в поле плоского горизонтально расположенного конденсатора. Найти разность потенциалов U между

пластинами конденсатора, если масса пузыря $m = 0,01г$ и расстояние между пластинами $d = 5см$.

Решение:

Со стороны электрического поля на капельку действует сила $\vec{F} = \vec{E}q$, которая уравновешивается силой тяжести $m\vec{g}$. Т. к. $\vec{E}q + m\vec{g} = 0$ или $Eq = mg$. Напряженность поля плоского конденсатора $E = \frac{U}{d}$. Тогда $\frac{Uq}{d} = mg$, откуда $U = \frac{mgd}{q} = 22кВ$

9. 62. Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 1 см$. От одной из пластин одновременно начинают двигаться протон и α - частица. Какое расстояние l пойдет α - частица за то время, в течение которого протон пройдет весь путь от одной пластины до другой?



Решение:

В поле плоского конденсатора на протон действует кулоновская сила $\vec{F}_1 = e\vec{E}$, на α - частицу действует кулоновская сила $\vec{F}_2 = 2e\vec{E}$, т. к. заряд α - частицы равен двум элементарным зарядам. Здесь e - элементарный заряд. Отсюда следует, что $F_2 = 2F_1$ - (1). В результате действия постоянной силы протон и

α - частица получают ускорения \vec{a}_1 и \vec{a}_2 . По второму закону Ньютона $\vec{F}_1 = m_p\vec{a}_1$; $\vec{F}_2 = m_\alpha\vec{a}_2$. С учетом (1) можно записать $m_\alpha a_2 = 2m_p a_1$. Если за время t протон прошел расстояние d , а α - частица прошла расстояние l , то $a_1 = \frac{2d}{t^2}$ и $a_2 = \frac{2l}{t^2}$. Тогда

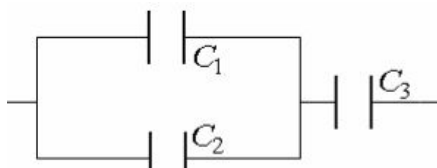
$$\frac{2m_\alpha d}{t^2} = \frac{4m_p l}{t^2}, \text{ откуда } l = \frac{2m_p d}{m_\alpha} = 0,5см.$$

9. 77. Найти емкость C земного шара. Считать радиус земного шара $R = 6400км$. На сколько изменится потенциал земного шара, если ему сообщить заряд $q = 1 Кл$?

Решение:

Имеем $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$. Подставляя числовые данные, получим $C = 4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6400 \cdot 10^3 = 711 мкФ$. Если земному шару сообщит заряд $q = 1 Кл$, его потенциал увеличится на величину $\Delta\varphi = \frac{q}{C} = 1406 В$.

9. 100. Найти емкость C системы конденсаторов, изображенной на рисунке. Емкость каждого конденсатора $C_i = 0,5 мкФ$.



Решение:

При параллельном соединении емкостью конденсаторов складывается, т. е.

$$C_{12} = C_1 + C_2 = 0,5 + 0,5 = 1 мкФ.$$

При последовательно соединении конденсаторов

C_{12} и C_3 определяется $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_3} = \frac{C_3 + C_{12}}{C_3 \cdot C_{12}}$ отсюда $C = \frac{C_3 C_{12}}{C_3 + C_{12}} = 0,33 \text{ мкФ}$.

Глава 2 . Постоянный электрический ток

§ 2.1. Постоянный электрический ток, его характеристики и условия существования

1. Электрическим током называется упорядоченное движение свободных электрических зарядов, происходящее через ту или иную поверхность S (например, через сечение проводника): Носителями тока в проводящей среде могут быть электроны (в металлах), либо ионы (в электролитах), либо ионы и электроны (в газах).

2. Постоянным называется электрический ток, сила и направление которого сохраняются с течением времени неизменными. Количественной мерой электрического тока служит сила тока, I т. е. заряд, переносимый сквозь рассматриваемую поверхность S в единицу времени:

$$I = \frac{q}{t} \quad (\text{определение электрического тока}) \quad (2. 1)$$

Единицей силы тока является: $[I] = \left[\frac{q}{t} \right] = \left(\frac{\text{Кл}}{\text{с}} \right) = \text{ампер} (A)$.

Сила постоянного тока в металлическом проводнике с площадью поперечного сечения S равна

$$I = n_0 e v s \quad (2. 2)$$

где n_0 - число свободных электронов единице объема; e - заряд электрона; v - скорость электронов вдоль линии тока; S - площадь поверхности (сечения) проводника.

Сила тока I является величиной скалярной и алгебраической.

3. Поверхностная плотность тока:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{n_0 e v s}{S} = n_0 e v \quad (2. 3)$$

Плотность тока вектор (кроме величины имеет еще направление). Формула (3) дана по

модулю. Единица плотности тока: $[j] = \left[\frac{I}{S} \right] = \left(\frac{A}{\text{м}^2} \right)$.

4. Для того чтобы в проводнике мог существовать постоянный ток проводимости необходимо:

- - напряженность электрического поля в проводнике должна быть отлична от нуля и должна быть постоянной.
- цепь постоянного тока проводимости должна быть замкнутой.
- на свободные электрические заряды, помимо Кулоновских сил, должны действовать не электростатические силы, называемые сторонними силами. Сторонние силы могут быть созданы источниками постоянного тока (гальваническими элементами, аккумуляторами, электрическими генераторами постоянного тока).
- за счет сторонних сил заряды движутся внутри источника в направлении, противоположном действию сил электростатического поля. На концах внешней цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи идет ток за счет энергии источника.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что называется постоянным электрическим током?
2. Что служит количественной мерой электрического тока?
3. Единицей силы тока является?

4. По какой формуле определяется поверхностная плотность тока?
 5. Что необходимо, чтобы в проводнике мог существовать постоянный ток?

§ 2. 2. Закон Ома для участка цепи, не содержащего э. д. с. Сопротивление проводников

1. Закон Ома (1787 - 1854) немецкий физик в 1826 экспериментально установлен согласно которому, сила тока I в цепи, не содержащей источников тока, пропорциональна разности потенциалов на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению R проводника (рис.2.1).

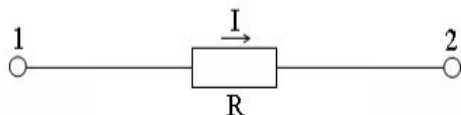


Рис. 2.1.

Участок электрической цепи, на котором не действуют сторонние силы приводящие к возникновению эдс называют однородным.

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R} \quad (2.4)$$

В случае однородного проводника напряжение U совпадает с разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$. Сопротивление R однородного проводника длиной l , площадью поперечного сечения S вычисляется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.5)$$

где - ρ - удельное сопротивление проводника

Единицей сопротивления служит $[R] = \left[\rho \frac{l}{S} \right] = \left(\text{Ом} \cdot \text{м} \frac{\text{м}}{\text{м}^2} \right) = (\text{Ом})$

Сила тока в системе СИ: $[I] = \left[\frac{U}{R} \right] = \left(\frac{\text{В}}{\text{Ом}} \right) = (\text{А}).$

Закон Ома для участка цепи сопротивлением R , разность потенциалов (падения напряжения) U на участке цепи равняется

$$U = IR \quad (2.6)$$

§ 2. 3. Электродвижущая сила (эдс)

1. Электродвижущей силой ε_{2-1} (эдс), действующей на участке 1-2 цепи (рис 2.2) называется величина, численно равная работе, которую совершают сторонние силы при перемещении на участке 1-2 единичного положительного заряда:

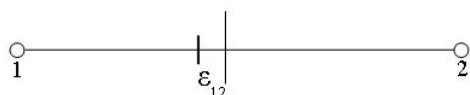


Рис. 2.2.

$$\varepsilon_{2-1} = \frac{A_{1-2}}{q} \quad (2.7)$$

Единицей эдс в системе СИ служит

$$[\varepsilon] = \left[\frac{A}{q} \right] = \left(\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right) = (\text{В}).$$

2. Напряжением (падением напряжения) u_{2-1} на участке цепи 1-2 называется физическая величина, численно равная полной работе, которая совершается Кулоновскими и сторонними силами при перемещении вдоль участка цепи единичного положительно заряда из точки 1 в точку 2 (рис 2. 2):

$$u_{2-1} = \frac{A_{1-2}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{2-1} \quad (2.8)$$

3. Напряжение на концах участка цепи 1-2 равно разности потенциалов в точках 1 и 2 только в том случае, если на этом участке не приложены эдс (см.рис 2.1): $u_{2-1} = \varphi_1 - \varphi_2$ при $\varepsilon_{2-1} = 0$.

§ 2. 4. Закон Ома для полной электрической цепи

1. Закон Ома для замкнутого контура, содержащего эдс (Закон Ома для

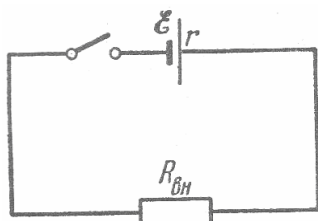


Рис. 2.3.

всей цепи): Сила тока I в замкнутом контуре , содержащем эдс, прямо пропорциональна эдс источника тока ε и обратно пропорциональна сумме сопротивление R внешней части контура и внутреннего сопротивления r самого источника (рис 2. 3):

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (2. 9)$$

2. Закон Ома для участка цепи содержащего эдс:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R + r} = \frac{u + \varepsilon}{R + r} \quad (2. 10)$$

Вопросы для закрепление пройденного

1. Как записывают и формулируют закон Ома для однородного участка цепи постоянного тока?
2. По какой формуле вычисляется сопротивление однородного проводника?
3. Как называется количественная мера работы сторонних сил?
4. Как читается закон Ома для замкнутой цепи?

§ 2.5. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа

1. Расчет разветвленных цепей упрощается если пользоваться правилами Кирхгофа (1824-1887)- немецкий физик открывшего в 1846 два правила. Первое из них относится к узлом цепи: Сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов направленных от узла или алгебраическая сумма токов сходящихся в узле, равна нулю (рис 2.4):

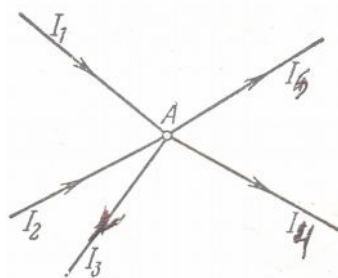


Рис. 2.4

$$\sum_1^2 I_{\text{вх}} = \sum_3^5 I_{\text{вых}} \quad \text{или} \quad \sum_{K=1}^n I_K = 0 \quad (2. 11)$$

Токи считаются положительными, если они направлены к узлу, отрицательными, если они направлены от узла. Записывается n-1 независимых уравнений правила узлов, где n число узлов например, если рассматриваемая в задаче схема имеет два узла А и В, составляется уравнение по первому закону Кирхгофа следует только для одного узла.

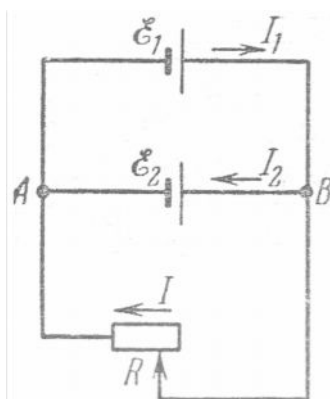


Рис. 2.5.

2. Второе правило Кирхгофа (правило Контуров): В любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений (т.е произведений сил токов I_k соответствующие сопротивление R_k) равна алгебраической сумме эдс, имеющих в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \quad (2. 12)$$

где i - число эдс; k - число сопротивлений в контуре.

Если токи I_k совпадают с выбранным направлением обхода контура, то они считаются положительными. эдс ε_i считаются положительными если они создают токи, направленные в сторону обхода контура. (рис. 2. 5)

3. Расчет разветвленной цепи постоянного тока проводится в такой последовательности:

- а) произвольно выбираются направления токов во всех участках цепи;
- б) записывается $n - 1$ независимых уравнений правила узлов, где n - число узлов в цепи;
- в) произвольные замкнутые контуры выделяются так, чтобы каждый новый контур содержал по крайней мере один участок цепи, не входящий в ранее рассмотренные контуры. В разветвленной цепи, содержащей n узлов и m участков цепи между соседними узлами, число независимых уравнений правила контуров равно $m - n + 1$.

4. При составлении электрической цепи проводники могут соединяться последовательно или параллельно. При последовательном соединении проводников (рис.2. 6)

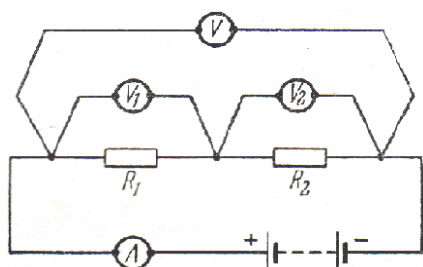


Рис. 2.6

а) сила тока во всех частях цепи одинаково:

$$I = const; \quad (2.13)$$

б) падение напряжения в цепи равно сумме падений напряжений на отдельных участках:

$$u = u_1 + u_2 \quad (2.14)$$

в) падение напряжения на проводниках прямо пропорционально их сопротивлениям

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.15)$$

г) общее сопротивление цепи, состоящей из n последовательно соединенных проводников равно сумме сопротивлений отдельных проводников:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.16)$$

5. При параллельном соединении проводников (рис 2.7)

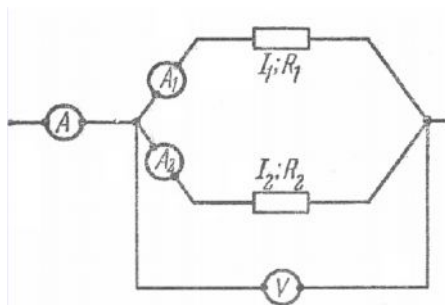


Рис. 2.7

а) сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов, текущих в разветвленный участках цепи:

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.17)$$

б) падения напряжения в параллельно соединенных участках цепи одинаковы: $u = const$;

в) силы токов в участках разветвленной цепи обратно пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.18)$$

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что называют ЭДС источника тока?
2. Каков физический смысл ЭДС? В каких единицах ее выражают?
3. Какой участок электрической цепи называют неоднородным?
4. Нарисуйте схемы включения измерительных приборов в последовательно соединенную цепь для изучения ее свойств.
5. Что называют узлом цепи? Ветвью цепи? Неразветвленным контуром? (Ответ иллюстрируйте рисунком).
6. С формулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа

§ 2. 6 Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца

1. Кулоновские и сторонние электрические силы совершают работу A при перемещении зарядов вдоль электрической цепи за счет энергии источника тока (когда действуют сторонние силы). Если электрический ток постоянен, то энергия W ; которая преобразуется за время t в объеме проводника равна совершенной работе:

$$W = A = Iut \quad (2. 19)$$

где I – сила тока, u – падение напряжения в проводнике.

2. Взаимодействие электронов проводимости с узлами кристаллической решетки металла (элементарными ячейками кристаллической решетки) электроны передают ионам энергию. Эта энергия идет на нагревание проводника. Так как $u = IR$ работу можно выразить так.

$$A = Iut = I^2 Rt \quad (2. 20)$$

где R сопротивление проводника.

3. Мощность электрического тока равна работе, которая совершается током за единицу времени:

$$p = \frac{A}{t} = Iu \quad (2. 21)$$

или

$$p = I^2 R \quad (2. 22)$$

– полезная мощность выделяемая на внешнем сопротивлении R .

4. Количество теплоты выделяющейся в проводнике за время t :

$$Q = W = Iut = I^2 Rt \quad (2. 23)$$

При измерении Q в калориях, а остальных величин в СИ:

$$Q = 0.24 \cdot rut = 0.24 I^2 Rt \quad (2. 24)$$

§ 2.7. Закон Фарадея (1791-1867) английский физик в 1833 открыл закон электролиза

1. Первый закон фарадея: масса вещества, выделяющегося на электроде, пропорциональна электрическому заряду q , прошедшему через электролит:

$$m = kq \text{ или } m = kIt \quad (2. 25)$$

где k – коэффициент пропорциональности называемая электрохимическим эквивалентом вещества.

2. Второй закон фарадея: Электрохимические эквиваленты вещества пропорциональны отношениям их атомных (молекулярных) масс A к валентности n : $k = c \frac{A}{n} = \frac{1}{F} \frac{A}{n}$ где

$F = \frac{1}{C}$ число Фарадея. $F = 9.6 \cdot 10^7 \frac{Кл}{\text{моль}}$; Объединенный закон Фарадея:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} I \cdot t \text{ или } m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q \quad (2. 26)$$

Заряд одновалентного иона ($n \approx 1$) $q = e = 1.6 \cdot 10^{-19} Кл$:

§2.8 Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия

1. Вакуумом называется такая степень разрежения газа, при которой можно пренебрегать соударениями между его молекулами и считать, что средняя длина свободного пробега \bar{l} превышает линейные размеры d сосуда, в котором газ находится ($\bar{l} \gg d$).

2. Термоэлектронной эмиссией называется испускание электронов твердыми телами при их нагревании. Для электрического тока в вакуумированной газоразрядной трубке имеет значения термоэлектронная эмиссия из нагретого Катода. Электроны, испускаемые нагретым телом называются термоэлектронами, а само тело – эмиттером. В результате термоэлектронной эмиссии может возникнуть термоэлектронный ток.

3. Двух электродная лампа – диод (рис.2.8)

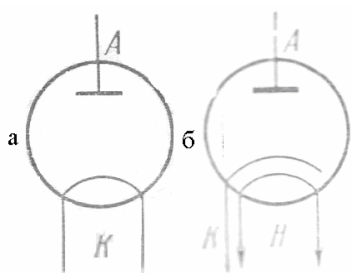


Рис. 2.8

а) электронными лампами называются устройства, основанные на применении явления термоэлектронной эмиссии. Простейшим из электронных ламп является двухэлектродная лампа прямого накала (рис.2.8а) и диод с подогревным катодом (рис.2.8б).

Если анод А лампы присоединить к положительному полюсу источника тока, а катод – к отрицательному, то в цепи лампы устанавливается постоянный термоэлектронный ток I_A

б) Диод прямого накала имеет существенный недостаток: если катод нагревается переменным током, то его температура периодически изменяется и это вызывает колебания тока в цепи лампы.

в) Диоды обладают односторонней (униполярной) проводимостью: ток в лампе возможен только в том случае если потенциал анода выше потенциала катода, т.е. напряжение $u_A > 0$. Если подать на анод отрицательный относительно катода потенциал, т.е. создать электрическое поле которое будет отталкивать электроны от анода, то лампы будет запрета – анодного тока т.е. тока в цепи лампы, не будет. Это свойство диодов позволяет применять их для выпрямления переменного тока.

4. Переменным электрическим током называется ток, изменяющихся по гармоническому закону. Переменный ток представляет собой вынужденные колебания тока в электрической цепи, происходящие с частотой ω , совпадающей с частотой вынуждающей эдс: $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$ где I_0 - амплитудное значения силы тока, φ - сдвиг фазы между колебаниями тока и эдс.

5. Вакуумная двух электронная лампа, которая служит для выпрямления переменного тока, называется **Кенотроном**.

Полупроводникам называется вещества, удельное электрическое сопротивление ρ которых занимают промежуточное положение между металлами ($\rho = 10^{-7} - 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$) и диэлектриками ($\rho > 1 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{ м}$). Широко применяемыми полупроводниками являются германий Ge , кремний Si и теллур Te .

Свойство односторонней проводимости $p - n$ перехода используют для создания полупроводниковых диодов, которые применяют для выпрямления переменного тока, они обладают рядом преимуществ перед вакуумными диодами (экономия энергии для получения носителей тока, миниатюрность, высокая надежность и большой срок службы). Недостатком полупроводниковых диодов является ограниченный интервал температур, в котором они работают (приблизительно от -70 до $+125^\circ\text{C}$)

6. Трех электродная лампа – триод

а) Для управления термоэлектронным током в лампе применяются много электродные (трех и более) лампы – триоды, тетроды, пентоды. В триоде между анодом и катодом помещен третий электрод – **управляющая сетка С**, сквозь которую проходят электроны, летящие от катода к аноду. Схематические обозначения триода прямого накала (а) и триода с подогревным катодом (б) указаны на рис 2.9.

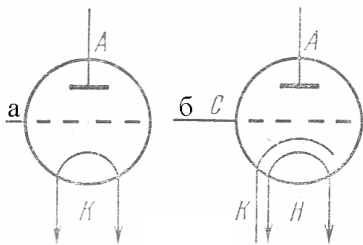


Рис. 2.9

Управляющая сетка располагается вблизи катода, так что, даже при малом напряжении u_c между сеткой и катодом (сеточное напряжение), вблизи катода создается сильное электрическое поле, которое существенно влияет на движение электронов в триоде.

б) Если потенциал сетки выше потенциала катода, т.е. сеточное напряжение u_c положительно ($u_c > 0$), то электрическое поле, создаваемое сеткой вблизи катода, совпадает по направлению с электрическим полем, существующим между анодом и катодом. Электроны, вылетающие из раскаленного катода, при этом движутся к аноду со скоростями большими, чем при $u_c = 0$. Число электронов, попадающих на анод за единицу времени а следовательно, и анодный ток в триоде возрастают при увеличении u_c . Если же, наоборот, $u_c < 0$ то электрическое поле сетки ослабляет электрическое поле между анодом и катодом и скорость движения электронов и анодный ток уменьшаются.

в) Отрицательное сеточное напряжения при котором анодный ток полностью прекращается, называется **напряжением запирания**. Таким образом изменяя сеточное напряжение u_c можно управлять током в лампе. По этому сетка С **называется управляющей**. Триод используется в радиотехнических устройствах для усиления слабых переменных токов в ламповом генераторе.

В 50 - х годов в науке и технике стали использовать полупроводниковые приборы, называемые транзисторами. Эти приборы содержат в себе два $p-n$ перехода.

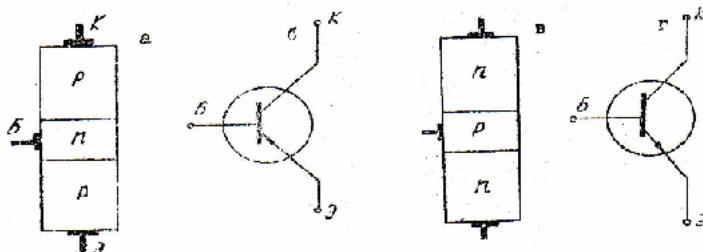


Рис. 2.10

На рис. 2. 10 показано схематическое изображение транзистора $p-n-p$ - типа (а) и $n-p-n$ - типа (в) и их условные обозначения в схемах (б, г).

На рис 2. 11 показана. Энергетическая диаграмма $n-p-n$ - перехода:

а) равновесное состояние, б) при включении по схеме с общей базой.

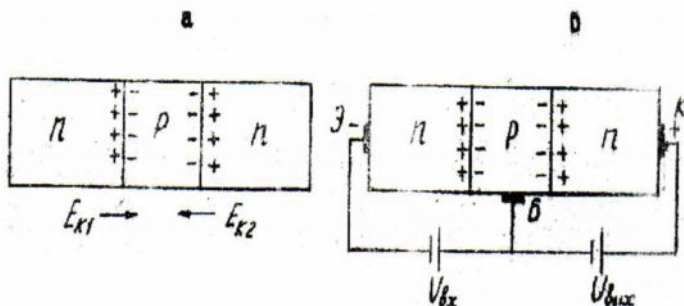


Рис. 2. 11

Вначале подключают источник тока таким образом, чтобы на полупроводник p - типа (акцепторный полупроводник) был подан положительный потенциал, а на полупроводник n - типа (донорный полупроводник) – отрицательный потенциал.

Тогда под действием созданного в $p-n$ - перехода электрического поля свободные электроны из области n - будут переходить в область p , дырки из области p перемещаться в область n .

Следовательно, в данном случае ток через $p-n$ - перехода создается основными носителями. При этом сопротивление $p-n$ - перехода мало и ток может быть большим.

Транзисторы предназначены главным образом для усиления слабых напряжений, и их используют в малогабаритных приемниках, а также в радиопередающих устройствах и электронно – вычислительных машинах.

Вопросы для закрепление пройденного

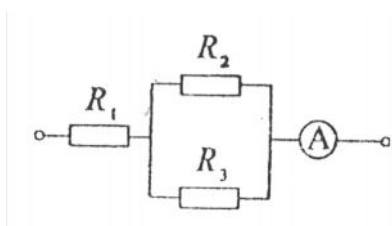
1. Напишите формулы для подсчета мощность постоянного тока и единица измерения?
2. Как записывают закон Джоуля – Ленца в СИ?
3. Как зависит количество теплоты, выделяемой током в проводниках, от сопротивления этих проводников?
4. По какому характерному признаку можно отличит полупроводник от металла?
5. Приведите примеры полупроходных веществ. Какие виды полупроводников существует. Что такое $p-n-p$ переход? На рисуйте схему и опишите по исследованию свойств $p-n$
10. 10. Найти падение потенциала U на медном проводе длиной $l = 500$ м и диаметром $d = 2$ мм, если ток в нем $I = 2$ А.

Решение типовых задач

Решение:

Ток, текущий по участку однородного проводника, подчиняется закону Ома, $I = \frac{U}{R}$, где U – падение потенциала на этом участке, R – сопротивление участка. Сопротивление провода $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ - удельное сопротивления меди. l – длина провода, S – площадь его поперечного сечения. Т. к. $S = \pi \frac{d^2}{4}$, то $R = \rho \frac{4l}{\pi d^2}$. Из закон Ома $U = IR = I\rho \frac{4l}{\pi d^2}$. Подставив числовые значения, найдем $U = 5,4$ В.

10. 11. Найти падения потенциал U в сопротивлениях $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 2$ Ом и $R_3 = 4$ Ом, если амперметр показывает ток $I_1 = 3$ А. Найти токи I_2 и I_3 в сопротивлениях R_2 и R_3 .



Решение:

По закону Ома $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$, откуда $U_1 = I_1 R_1 = 12$ Ом. Полное сопротивление цепи $R = R_1 + R_{23}$, где $\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$;

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{8}{6} \text{ Ом.}$$

Падения потенциала на всем

участке цепи $U = U_1 + U_{23}$. При параллельном сопротивлении все сопротивления находятся под одной разностью потенциала, следовательно, $U_{23} = U_2 = U_3$. Согласно закону Ома $U = I_1 R = I_1 (R_1 + R_{23})$, тогда $U_2 = U_3 = U - U_1$; $U_2 = U_3 = I_1 (R_1 + R_{23}) - U_1 = 4$ В. Сопротивления R_1 и эквивалентное сопротивления R_{23} соединены последовательно,

следовательно, токи, текущие через них, равны $I_1 = I_{23}$, где $I_{23} = I_2 + I_3$ т. е. $I_1 = I_2 + I_3$ По закону Ома $I_2 = \frac{U_2}{R_2} = 2 \text{ A}$, тогда $I_3 = I_1 - I_2 = 1 \text{ A}$.

10. 12. Элемент, имеющий э.д.с. $\varepsilon = 1,1 \text{ В}$ и внутреннее сопротивление $r = 1 \text{ Ом}$, замкнут на внешнее сопротивление $R = 1 \text{ Ом}$. Найти ток I в цепи, падение потенциала U во внешней цепи и падение потенциала U_r внутри элемента. С каким к. п. д η работает элемент?

Решение:

Согласно закону Ома для замкнутой цепи $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$; $I = 0,11 \text{ А}$. Согласно закону Ома для однородного участка цепи $I = \frac{U}{R}$, откуда $U = IR = 0,99 \text{ В}$. Кроме того, $I = \frac{U_r}{r}$, откуда $U_r = I \cdot r = 0,11 \text{ В}$. К. п. д. источника тока равен отношению мощности P_1 , выделяемой внешним участком цепи (полезной мощности), к полной мощности P , развиваемой источником: $\eta = \frac{P_1}{P}$, где $P_1 = I^2 R$; $P = \varepsilon I$. Тогда к. п. д. источника $\eta = \frac{IR}{\varepsilon}$; $\eta = 0,9$.

10. 14. Элемент с э. д. с. $\varepsilon = 2 \text{ В}$ имеет внутреннее сопротивление $r = 0,5 \text{ Ом}$. Найти падение потенциала U_r внутри элемента при токе в цепи $I = 0,25 \text{ А}$. Каково внешнее сопротивление цепи R при этих условиях?

Решение:

Падение потенциала внутри элемента $U_r = I \cdot r = 0,125 \text{ В}$ (см задачу 10. 12). Согласно закону Ома для замкнутой цепи сила тока $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, откуда $R = \frac{\varepsilon}{I} - r$; $R = 7,5 \text{ Ом}$.

10. 15. Элемент с э. д. с. $\varepsilon = 1,6 \text{ В}$ имеет внутреннее сопротивление $r = 0,5 \text{ Ом}$. Найти к. п. д. η элемента при токе в цепи $I = 2,4 \text{ А}$.

Решение:

К. п. д. элемента $\eta = \frac{IR}{\varepsilon}$ (см. задачу 10. 12). По закону Ома для замкнутой цепи $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, откуда $R = \frac{\varepsilon - I \cdot r}{I}$. Тогда $\eta = \frac{\varepsilon - Ir}{\varepsilon} = 25\%$.

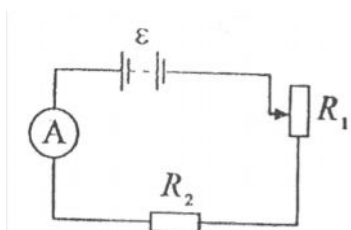
10. 16. Э. д. с. элемента $\varepsilon = 6 \text{ В}$. При внешнем сопротивлении $R = 1,1 \text{ Ом}$ ток в цепи $I = 3 \text{ А}$. Найти падение потенциала U_r внутри элемента и его сопротивление r .

Решение:

Согласно второму закону Кирхгоффа $U_r + IR = \varepsilon$, откуда $U_r = \varepsilon - IR$; $U_r = \varepsilon - IR = 2,7 \text{ В}$. По закону Ома для участка цепи $I = \frac{U_r}{r}$, откуда $r = \frac{U_r}{I} = 0,9 \text{ Ом}$.

10. 24. Батарея с э. д. с. $\varepsilon = 20 \text{ В}$, амперметр и реостаты с сопротивлениями R_1 и R_2 соединены последовательно. При выведенном реостате R_1 амперметр показывает ток

$I = 8 \text{ A}$, при введенном реостате R_1 - ток $I = 5 \text{ A}$. Найти сопротивления R_1 и R_2 реостатов и падения потенциала U_1 и U_2 на них, когда реостат R_1 полностью включен.



Решение:

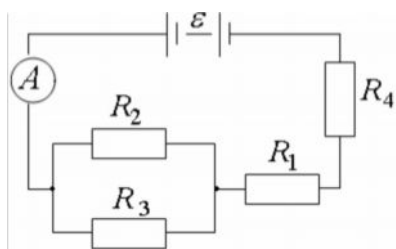
Задачу решаем в предположении равенства нулю внутреннего сопротивления э. д. с. и сопротивления амперметра. По закону Ома для всей цепи при выведенном реостате R_1 ток

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_2} \quad (1), \text{ а при введенном реостате } R_1 \text{ ток } I_2 = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2}$$

(2). Решая совместно уравнения (1) и (2), находим $R_2 = \frac{\varepsilon}{I_1} = 2,5 \text{ Ом}$; $R_1 = \frac{\varepsilon}{I_2} - R_2 = 1,5 \text{ Ом}$.

По закону Ома для участка цепи падение потенциалов на реостатах $U_1 = I_2 R_1 = 7,5 \text{ В}$; $U_2 = I_2 R_2 = 12,5 \text{ В}$.

10. 30. Батарея с э. д. с. $\varepsilon = 10 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 1 \text{ Ом}$ имеем к. п. д. $\eta = 0,8$ (см. рисунок к задаче 10. 30). Падения потенциала на сопротивлениях R_1 и R_4 равны $U_1 = 4 \text{ В}$ и $U_4 = 2 \text{ В}$. Какой ток I показывает амперметр? Найти падение потенциала U_2 на сопротивлении R_2 .



Решение:

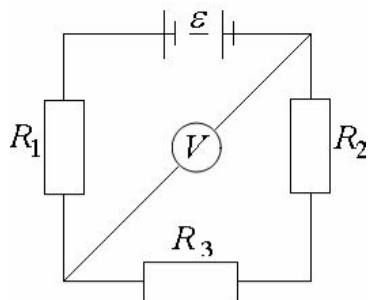
По закону Ома для замкнутой цепи ток, текущий через амперметр, равен $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ - (1). Полное сопротивление

цепи R найдем из соотношения $\eta = \frac{\varepsilon}{R + r}$, откуда

$R = \frac{r\eta}{1 - \eta} = 4 \text{ Ом}$. Тогда из (1) ток $I = 2 \text{ А}$. Согласно второму закону Кирхгоффа

$$U_1 + 2U_2 + U_4 = \varepsilon, \text{ откуда } U_2 = \frac{\varepsilon - U_1 - U_4}{2} = 2 \text{ В}.$$

10. 31. Э. д. с батареи $\varepsilon = 100 \text{ В}$, сопротивления $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 200 \text{ Ом}$ и $R_3 = 300 \text{ Ом}$ сопротивление вольтметра $R_V = 2 \text{ кОм}$. Какую разность потенциалов U показывает вольтметр?(смотри рис к задаче 10. 31).



Решение:

По закону Ома для замкнутой цепи ток, текущий через сопротивление R_1 и через эквивалентное сопротивление параллельного участка цепи R' , равен $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ или, поскольку внутренним сопротивлением источника r мы пренебрегаем, $I = \frac{\varepsilon}{R}$ - (2). Эквивалентное сопротивление R'

найдем из соотношения: $\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_2 + R_3}$; $R' = \frac{R_V(R_2 + R_3)}{R_2 + R_3 + R_V} = 400 \text{ Ом}$. Тогда из (2)

получим $R = 500 \text{ Ом}$. Из (1) найдем $I = 0,2 \text{ А}$. Сумма токов, текущих через вольтметр и сопротивления R_2 и R_3 , равна току I ; $I = I_V + I_{23}$, где $I_V = \frac{U}{R_V}$; $I_{23} = \frac{U}{R_2 + R_3}$. Т. е.

$$I = \frac{U}{R_V} + \frac{U}{R_2 + R_3} = \frac{U(R_2 + R_3 + R_V)}{R_V(R_2 + R_3)} \text{ или } I = \frac{U}{R'}. \text{ Отсюда } U = IR' = 80 \text{ В}.$$

10. 32. Сопротивления $R_1 = R_2 = R_3 = 200 \text{ Ом}$ (см. рисунок к задаче 10. 31), сопротивление вольтметра $R_V = 1 \text{ кОм}$. Вольтметр показывает разность потенциалов $U = 100 \text{ В}$. Найти э. д. с. ε батареи.

Решение:

По закону Ома для замкнутой цепи ток, текущий через сопротивление R_1 и через эквивалентное сопротивление параллельного участка цепи R' , $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ или, поскольку

внутренним сопротивлением источника r мы пренебрегаем, $I = \frac{\varepsilon}{R}$ - (1). Сумма токов,

текущих через вольтметр и сопротивления R_2 и R_3 , равна току I . $I = I_V + I_{23}$ $I_V = \frac{U}{R_V}$;

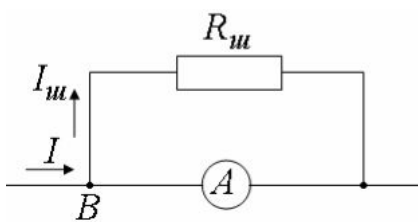
$I_{23} = \frac{U}{R_2 + R_3}$. Отсюда $I = \frac{U}{R_V} + \frac{U}{R_2 + R_3} = 0,35 \text{ А}$. Полное сопротивление цепи $R = R_1 + R'$.

Эквивалентное сопротивление R' найдем из соотношения: $\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_2 + R_3}$;

$R' = \frac{R_V(R_2 + R_3)}{R_2 + R_3 + R_V}$. Тогда $R = R_1 + \frac{R_V(R_2 + R_3)}{R_2 + R_3 + R_V}$; $R = 485 \text{ Ом}$. Из (1) найдем $\varepsilon = IR$.

Подставляя числовые данные, получим $\varepsilon = 170 \text{ В}$.

10.34. Амперметр с сопротивлением $R_A = 0,16 \text{ Ом}$ шунтирован сопротивлением $R_{ш} = 0,04 \text{ Ом}$. Амперметр показывает ток $I_0 = 8 \text{ А}$. Найти ток I в цепи. (см рис. К задаче 10. 34).

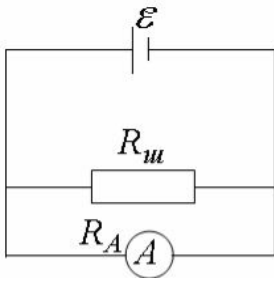


Решение:

Шунтирующее сопротивление подключается параллельно амперметру, следовательно, ток в цепи $I = I_0 + I_{ш}$. Падения напряжения на сопротивлениях амперметра и шунта одинаковы, поэтому $I_0 R_A = I_{ш} R$; $I_{ш} = I_0 \frac{R_A}{R}$. Тогда

$I = I_0 + I_0 \frac{R_A}{R} = I_0 \left(I + \frac{R_A}{R} \right)$. Подставляя числовые данные, получим $I = 40 \text{ А}$.

10. 35. Имеется предназначенный для измерения токов до $I = 10 \text{ А}$ амперметр с сопротивлением $R_A = 0,18 \text{ Ом}$, шкала которого разделена на 100 делений. Какое сопротивление R надо взять и как его включить, чтобы этим амперметром можно было измерять ток до $I_0 = 100 \text{ А}$? Как изменится при этом цена деления амперметра?



Решение:

Если необходимо измерить силу тока в n раз большую, чем можно измерить данным амперметром, т. е. $\frac{I_0}{I} = n = 10$, то следует параллельно подключить шунт с сопротивлением $R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}$. Таким образом, $R_{ш} = 0,02 \text{ Ом}$. Цена деления без шунтра равна $0,1 \text{ А}$, с шунтом 1 А .

10. 46. Батареи с э. д. с. $\varepsilon = 240 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 1 \text{ Ом}$ замкнута на внешнее сопротивление $R = 23 \text{ Ом}$. Найти полную мощность P_0 , полезную мощность P и к. п. д η батареи.

Решение:

К. п. д. батареи $\eta = \frac{R}{R+r} = 0,96$. Полная мощность батареи $P_0 = \varepsilon I$, где согласно закону Ома

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}, \text{ т. е. } P_0 = \frac{\varepsilon^2}{R+r}; P_0 = 2,4 \text{ кВт}. \text{ Полезная мощность } P = \eta P_0 = 2,3 \text{ кВт}.$$

10. 47. Найти внутреннее сопротивление r генератора, если известно, что мощность P , выделяющаяся во внешней цепи, одинакова при внешних сопротивлениях $R_1 = 5 \text{ Ом}$ и $R_2 = 0,2 \text{ Ом}$. Найти к. п. д. η генератора в каждом из этих случаев.

Решение:

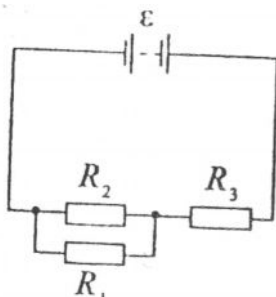
Мощность, выделяющаяся во внешней цепи: $P = I_1^2 R_1$ или $P = I_2^2 R_2$. Согласно закону Ома

$$\text{для замкнутой цепи } I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1+r}, \text{ а } I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2+r}. \text{ Тогда } P = \frac{\varepsilon^2 R_1}{(R_1+r)^2} = \frac{\varepsilon^2 R_2}{(R_2+r)^2}, \text{ от куда}$$

$$R_1(R_2+r)^2 = R_2(R_1+r)^2. \text{ Раскрыв скобки и проведя несложные преобразования, найдем } r = \sqrt{R_1 R_2} = 1 \text{ Ом}. \text{ Для первого сопротивления к. п. д. генератора } \eta_1 = \frac{R_1}{R_1+r} = 83\%. \text{ Для}$$

$$\text{второго сопротивления } \eta_2 = \frac{R_2}{R_2+r} = 17\%.$$

10. 55. Э. д. с. батареи $\varepsilon = 120 \text{ В}$, сопротивления $R_1 = 25 \text{ Ом}$, $R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом}$. Найти мощность P_1 , выделяющуюся на сопротивлении R_1 .



Решение:

Т. к. сопротивления R_1 и R_2 соединены параллельно, то и $U_1 = U_2$. Общее сопротивление внешней цепи $R = R_{12} + R_3 = 120 \text{ Ом}$. По закону Ома для всей цепи ток

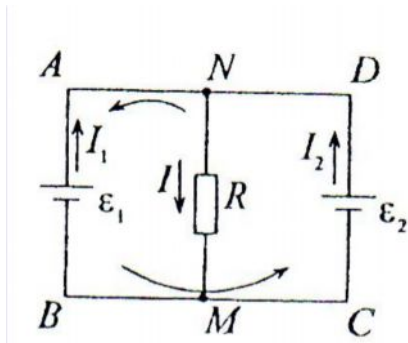
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = 1 \text{ А}. \text{ Согласно первому закону Кирхгоффа } I = I_1 + I_2 -$$

(1) и, кроме того, $I_1 R_1 + I_2 R_2 -$ (2). Решая совместно уравнения (1) и (2), находим ток через

сопротивление R_1 : $I_1 = \frac{IR_2}{R_2 + R_1} = 0,8 \text{ A}$. Тогда мощность, выделяющаяся на сопротивлении

$$R_1: P_1 = I_1 U_1 = I_1^2 R_1 = 16 \text{ Вт}.$$

10. 79. Два элемента с одинаковыми э. д. с. $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2 \text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1 \text{ Ом}$ и $r_2 = 2 \text{ Ом}$ замкнуты на внешнее сопротивления R . Через элемент с э. д. с. ε_1 течет ток $I_1 = 1 \text{ А}$. Найти сопротивление R и ток I_2 , текущий через элемент э. д. с. ε_2 . Какой ток I течет через сопротивления R ?



Решение:

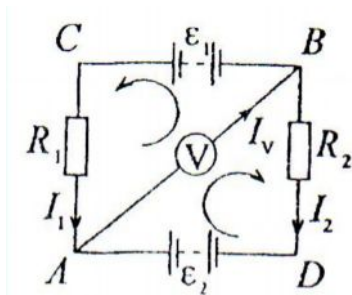
Выберем и рассмотрим два контура $ABCD$ и $ABMN$. Для каждого из них выберем направление обхода. Предположительно определим направление токов в каждом из элементов схемы. По второму правилу Кирхгоффа для контура $ABCD$ имеем $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = I_2 r_2 - I_1 r_1$ - (1); для контура $ABMN$ имеем $-\varepsilon_1 = -I_1 r_1 - IR$ - (2). По первому правилу Кирхгоффа для узла N имеем $I = I_1 + I_2$ - (3). Из

уравнения (1) ток $I_2 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 + I_1 r_1}{r_2} = 0,5 \text{ А}$. Решаем систему уравнений методом

подстановки, т. к. у нас есть три уравнения и три неизвестных. Подставив найденное значение тока I_2 в уравнение (3), найдем ток $I = I_1 + I_2 = 1,5 \text{ А}$. Из уравнения (2)

сопротивление $R = \frac{\varepsilon_1 - I_1 r_1}{I} = 0,66 \text{ Ом}$.

10. 94. Батареи имеют э. д. с. $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, сопротивления $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$, сопротивление вольтметра $R_V = 150 \text{ Ом}$ (см. рисунок к задаче 10. 94). Показание вольтметра $U = 150 \text{ В}$. Найти э. д. с. ε_1 и ε_2 батарей.



Решение:

По первому правилу Кирхгоффа $I_1 + I_2 = I_V$. По второму правилу Кирхгоффа для контуров ABC и ABD соответственно имеем: $I_1 R_1 + I_V R_V = \varepsilon_1$ и $I_2 R_2 + I_V R_V = \varepsilon_2$. По закону Ома $I_V R_V = U$, отсюда $I_1 R_1 + U = \varepsilon_1$ и $I_2 R_2 + U = \varepsilon_2$. Т. к. $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ и $R_1 = R_2$, то $(I_1 + I_2)R_1 + 2U = 2\varepsilon_1$; $I_V R_V + 2U = 2\varepsilon_1$; $\varepsilon_1 = \frac{I_V R_1}{2} + U$. По

закону Ома $I_V = \frac{U}{R_V}$, отсюда $\varepsilon_1 = \frac{UR_1}{2R_V} + U = U \left(\frac{R_1}{2R_V} + 1 \right)$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 200 \text{ В}$.

Глава 3 . Электромагнетизм

§ 3. 1. Магнитное поле. Вектор индукции магнитного поля закон Био – Савара – Лапласа

1. Всякий электрический ток создает магнитное поле. Интенсивность магнитного поля в данной точке характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} . Величина и направление этого вектора определяется законом Био (1774 - 1862) – Савара (1791 - 1841) – Лапласа (1749 - 1827) французские физики (рис. 3. 1.)

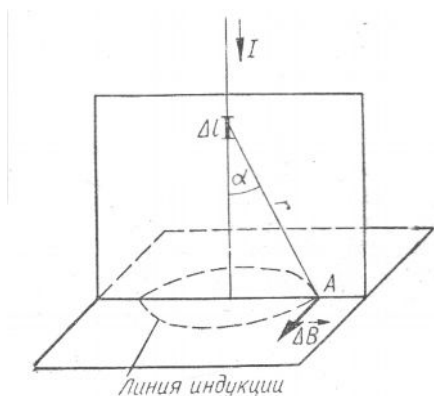


Рис. 3. 1

$$\Delta B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r^2} = I\Delta l \sin \alpha \quad (3. 1)$$

Из рис. 3.1 видно $\sin \alpha = \frac{R}{r}$

Здесь ΔB - магнитная индукция в точке А, создаваемая током I протекающим через элемент провода длиной Δl ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma}{M}$ или Ом. С (см. ниже) – магнитная постоянная; μ - магнитная проницаемость среды; r - радиус – вектор,

соединяющий элемент, Δl с точкой А, в которой вычисляется индукция; α - угол между направлением, тока в элементе и радиус вектором r

2. Вектор $\Delta \vec{B}$ перпендикулярен плоскости в которой лежат элемент Δl и радиус – вектор \vec{r} . Его направление определяется по правилу буравчика см. Рис. 3.2 (если буравчик в

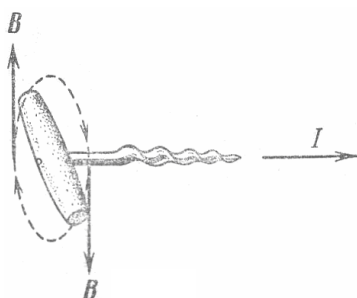


Рис. 3. 2

ввинчивать в направлении тока). Единица магнитной индукции - $1B \cdot c / m^2 = 1Bб / m^2 = 1Tл$.

Так как Тл – крупная единица, иногда пользуются единицей гаусс (Гс), $1Гс = 10^{-4} Tл = 10^{-4} Bб / m^2$.

3. Если индукция в данной точке поля создается несколькими токами, то результирующая индукция \vec{B} равна геометрической сумме индукций, создаваемых каждым током в отдельности (принцип наложения полей).

4. Магнитная индукция бесконечного прямого тока (рис. 3.3)

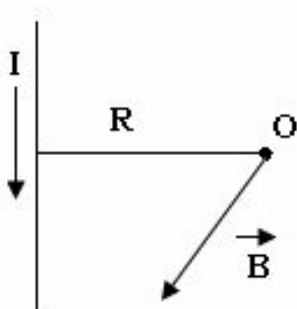


Рис. 3. 3

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} \quad (3. 2)$$

где R – расстояние от проводника до точки, в которой определяется индукция.

5. Магнитная индукция в центре кругового (кольцевого) тока (рис. 3. 4)

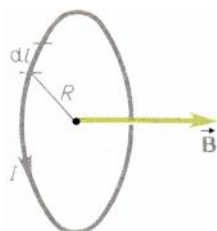


Рис. 3.4

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} \quad (3. 3)$$

6. Магнитная индукция кольцевого тока в точке на оси Кольца (рис.3.5)

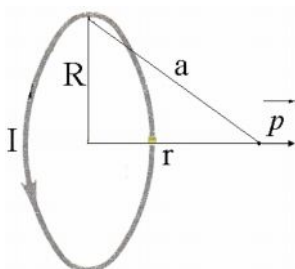


Рис. 3.5

$$B = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2a^3} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi(R^2 + r^2)^{3/2}} Pm \quad (3. 4)$$

$$\vec{P} = I\vec{S}$$

где S – площадь, обтекаемая током; P – магнитный момент контура с током, вектор, направление которого определяется по правилу буравчика.

7. Магнитная индукция на оси длинного прямого соленоида вдали от его концов (при условии $l \gg R$; где l – длина катушки; R – радиус витка) n – число витков соленоида и тороида на его Оси (рис. 3. 6)

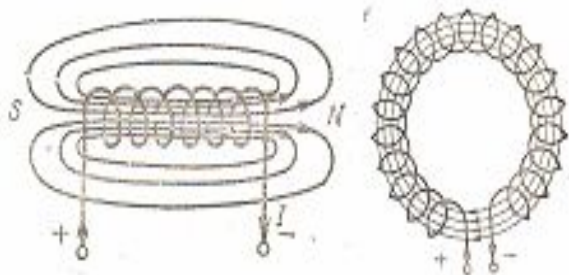


Рис. 3.6

$$B = (\mu\mu_0 In) \quad (3. 5)$$

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что называют магнитным полем, чем она создается и на что действует?
2. По какой формуле определяется модуль вектор магнитной индукции по закону Био – Савара – Лапаласа.
3. Установите единицу магнитной индукции в СИ и сформулируйте определение этой единицы.
4. Что называют магнитной проницаемостью среды? Какая формула выражает смысл этого понятия?
5. Что называют магнитной постоянной? Каково ее значение? Что называют абсолютной магнитной проницаемостью вещества?
6. По каким формулам определяют в вакууме и веществе магнитную индукцию поля, созданного током, текущим по круговому витку, в центре этого витка?
7. По каким формулам определяют в вакууме и веществе магнитную индукцию поля, созданного током, текущим по бесконечно длинному соленоиду на его оси?

§ 3. 2.Магнитный поток

Поток Φ вектора магнитной индукции \vec{B} через площадку S равен произведению составляющей этого вектора B_n , нормальной к площадке, на величину площадки (рис. 3. 7)

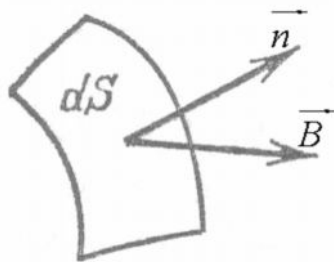


Рис. 3.7

$$\Phi = B_n S = BS \cos(\vec{B}, \vec{n}) \quad (3. 6)$$

где \vec{n} – вектор нормали к площадке $\Phi = \Phi_{\text{макс}} = BS$. Когда вектор индукции \vec{B} перпендикулярен к площадке S . Единицей магнитного потока является вольт – секунда, или вебер (Вб). Применяется также более мелькая единица – максвелл, равная 10^{-8} Вб . т. е $1 \text{ мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}$

§ 3. 3.Закон Ампер (1775 - 1836) французский физик, математик, химик

1. На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила. Закон Ампера:

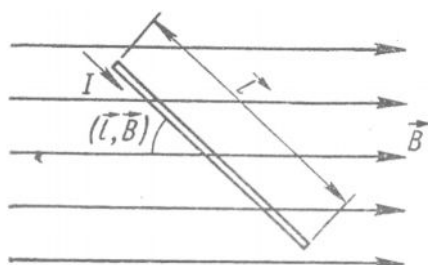


Рис. 3.8

сила, с которой магнитное поле с индукцией \vec{B} воздействует на прямой проводник длиной l в которой течет ток I равна (рис. 3.8)

$$\vec{F} = I[\vec{l} \times \vec{B}] \text{ или } F = Il \sin(\vec{l}, \vec{B}) \quad (3. 7)$$

2. Очевидно, что $F = F_{\text{макс}}$, когда проводник l перпендикулярен к \vec{B} . т. к. $\sin 90^\circ = 1$

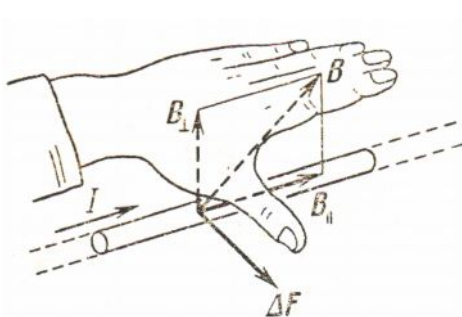


Рис. 3.9

Направление силы \vec{F} определяется по правилу левой руки: если расположит левую руки так, чтобы вектор магнитной индукции \vec{B} входил в ладонь (рис. 3. 9), а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением тока, то отогнутый большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током

§ 3. 4.Сила Лоренца. (1853 – 1928) Нидерландский физик теоретик

1. Сила, действующая на заряд q движущийся со скоростью \vec{v} в магнитном поле с индукцией \vec{B} равна:

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}] \text{ или } F = qvB \sin(\vec{v}, \vec{B}) \quad (3. 8)$$

2. Сила Лоренца направлен всегда перпендикулярно к скорости движения заряда следовательно, сила Лоренца не совершает работы и сообщает ему нормальное ускорение.

$$a_n = \frac{g^2}{R}$$

где R – радиус кривизны траектории. На рис 3.10

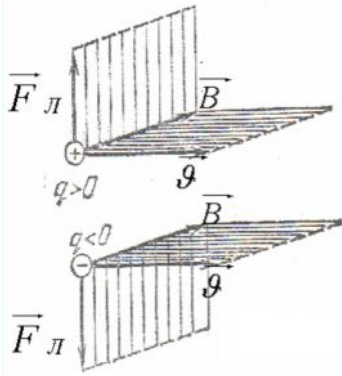


Рис. 3.10

показаны взаимные расположения векторов \vec{g} , \vec{B} и \vec{F} для положительного ($q > 0$) и отрицательного ($q < 0$) зарядов.

3. С помощью силы Лоренца можно определить магнитной индукции в данной точке действующий на заряд движущейся со скоростью \vec{g} .

$$B = \frac{F_{\text{л макс}}}{qg} \quad (3.9)$$

4. Если на движущийся заряд кроме магнитного поля действует электрическое поле с напряженностью \vec{E} , то результирующая сила действующей на заряд сила равна векторной сумме:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{g} \times \vec{B}] \quad (3.10)$$

§ 3.5. Взаимодействие между параллельными проводниками с токами

1. Сила взаимодействия между двумя параллельными проводниками длиной l с токами I_1 и

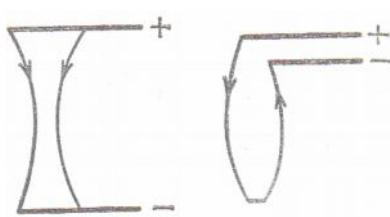


Рис. 3.11

I_2 , расстояние между которыми равно a ($l \gg a$) по модулю:

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a} \quad (3.11)$$

и направлена перпендикулярно проводникам. рис 3. 11.

2. Сила действующая на единицу длины провода в вакууме $F = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{a}$ (3.12)

§ 3.6. Работа электромагнитных сил

1. На прямолинейный провод длиной l с током I , расположенный в магнитном поле с индукцией B , направленной перпендикулярно к l , действует электромагнитная сила (рис.3. 12)

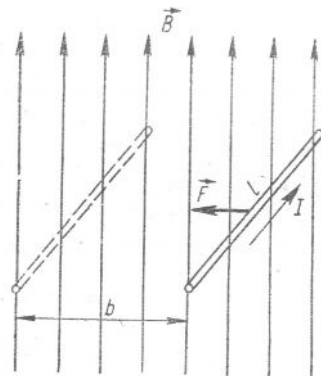


Рис. 3. 12

$$F = IlB \quad (3.13)$$

2. Если этот провод переместится на расстояние в направлении силы, то совершенная работа при этом

$$A = Fv = IlBv = IBS = I\phi \quad (3.14)$$

где $\phi = BS$ – магнитный поток. (рис.3. 12)

3. Работа, совершаемая при перемещении контура с током в магнитном поле (рис.3. 13)

$$A = \pm I(\phi_2 - \phi_1) = \pm I\Delta\phi \quad (3.15)$$

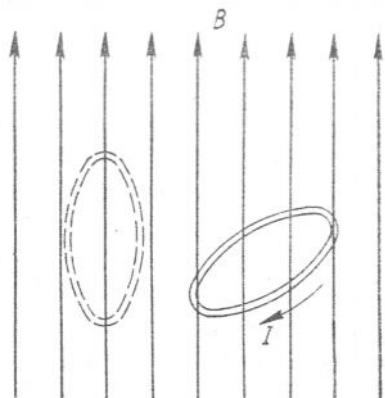


Рис. 3.13

где $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ - разность потоков сквозь контур в конце и в начале движения соответственно. Если контур движется под действием сил поля, то приращение $\Delta\phi$ потоков всегда положительно, т.е. силы поля стремятся увеличить поток через контур.

Если же приращение $\Delta\phi$ потоков отрицательно, то это может произойти только под действием внешних сил.

Вопросы для закрепления для пройденного

1. Что называют магнитным потоком (ответ иллюстрируйте рисунком)? Скалярной или векторной величиной является магнитный поток?
2. Какой вид имеют формулы, магнитной потока, когда магнитное поле однородно?
3. Установите единицу магнитного потока в СИ и сформулируйте определение этой единицы.
4. Как записывают закон Ампера, определяющий силу, с которой магнитное поле действует на элемент тока? На проводник с током если магнитное поле является однородным.
5. От чего зависит направление силы Ампера и как ее определяют? (Поясните рисунком)
6. Объясните с помощью правил правого винта и левой руки, как зависит направление сил магнитного взаимодействия параллельных токов от направлений этих токов.
7. Как взаимодействуют между собой параллельные токи? Вызывается ли их взаимодействие электрическим полем?
8. Каков характер действия сила Лоренца? Чему равна работа, совершаемая этой силой?

Глава 4 . Магнитное поле в веществе

§ 4. 1. Намагничивание вещества. Намагниченность

1. **Поле в магнитике.** Если в магнитное поле, образованное токами в проводниках \vec{B}_0 ввести вещество, поле изменится. Это объясняется тем, что всякое вещество является магнитиком, т.е способно под действием магнитного поля намагничиваться – приобретать магнитный момент. Намагниченное вещество создает свое магнитное поле \vec{B}' , которое вместе с первичным полем \vec{B}_0 обусловленным токами проводимости, образует результирующее поле

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (4.1)$$

Поле \vec{B}' как и поле токов проводимости, не имеет магнитных зарядов т.е. источников, поэтому для результирующего поля \vec{B} при наличии магнитика справедлива теорема Гаусса:

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (4.2)$$

т. е. поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю.

2. Механизм намагничивания.

Большинство веществ при внесении в магнитное поле намагничиваются слабо. Сильными магнитными свойствами обладают только ферромагнитные вещества: железо, никель, кобальт, многие их сплавы и др.

Степень намагничивания магнетика характеризуют магнитным моментом единицы объема: Эту величину называют намагниченностью и обозначают

$$j = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{P}_m \quad (4.3)$$

где ΔV физически малый объем в окрестности данной точки, \vec{P}_m - магнитный момент отдельной молекулы. Суммирование проводится по всем молекулам в объеме ΔV .

3. Связь между \vec{B} и \vec{H} . Для магнетиков

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (4.4)$$

Величина $\mu = B / B_0$, магнитной проницаемостью вещества

где B - магнитная индукция в данной среде, B_0 магнитная индукция в вакууме.

где μ - магнитная проницаемость среды у парамагнетиков $\mu > 1$, у диамагнетиков $\mu < 1$: Вi, СИ, Ag, и. т. д. к парамагнетиком относятся: Na, Mg, K, Al и. т. д у ферромагнетиков $\mu \gg 1$.

§ 4.2. Типы магнетиков

1. Магнетики подразделяются по своим магнитным свойствам на слабомагнитные и сильномагнитные вещества. К слабомагнитным относятся, парамагнетики и диамагнетики. Сильномагнитных веществ составляют ферромагнетики.

2. Диамагнетиками называются вещества, у которых магнитные моменты атомов (или молекул) в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю $\vec{P}_m = 0$.

И только в магнитном поле существуют наведенные магнитные моменты. Если воздействие намагничивающего поля прекращается сразу размагничиваются.

3. Парамагнетиками называются вещества у которых атомы (или молекулы) в отсутствии внешнего магнитного поля обладают некоторым постоянным магнитным моментом \vec{P}_m .

4. Ферромагнетиками называются вещества твердые в которых внутреннее магнитное поле в сотни и тысячи раз превышает вызывающее его внешнее магнитное поле. Основные свойства ферромагнитных веществ отличающие их от других типов магнетиков:

а) Зависимость относительной магнитной проницаемости μ от (H) имеет сложный характер (рис. 4. 1). Например для, железа $\mu = 5000$ для сплава пермалоя $\mu = 800000$.

Кроме нелинейной зависимости $B(H)$ или $\vec{j}(H)$ для ферромагнетиков характерно также явление магнитного гистерезиса [(отставания изменения намагниченности \vec{j} от изменения напряженности) переменного по величине и направлению внешнего намагничивающего магнитного поля \vec{H} . (рис 4.2)]

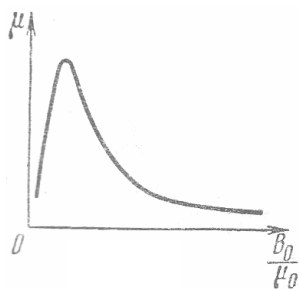


Рис. 4.1

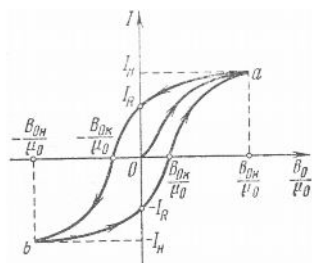


Рис. 4.2

эти свойства ферромагнитных веществ обнаруживаются при температурах, меньших точки Кюри θ К. При температурах $T \geq \theta$ К. тепловое движение разрушает область спонтанной намагниченности и ферромагнетик, теряя свои особенности превращается в парамагнитное вещество. Точка Кюри для железа $\theta=1063$ К для никеля $\theta=623$ К, для Кобальта $\theta=1423$ К для сплава пермаллоя $\theta=823$ К.

Применение ферромагнетиков

1. Ферромагнетики делятся на две группы: магнитномягкие материалы, у которых площадь петли гистерезиса мала и, следовательно, малы остаточная индукция и коэрцитивная сила. К таким ферромагнетиком относятся химически чистое железо, электротехническая сталь, пермаллой (сплав железа с никелем) и. т. д. Эти вещества полностью теряют намагниченность после удаления их из внешнего поля.
2. Магнитномягкие материалы используют в тех электротехнических устройствах, в которых происходит непрерывное перемагничивание сердечников, магнитопроводов и других частей (например, в трансформаторах, генераторах переменного тока, электродвигателях).
3. Ко второй группе относятся магнитожесткие материалы, у которых площадь петли гистерезиса, остаточная индукция и коэрцитивная сила велики, и в значительной степени сохраняют свою намагниченность и после вынесения их за пределы внешнего поля. К таким ферромагнетиком относятся углеродистая сталь, хромистая сталь и специальные сплавы. Магнитожесткие материалы не используют в основном для изготовления постоянных магнитов. Большое применение в радиотехнике имеют также ферриты – вещества, являющиеся химическими соединениями оксида железа с оксидами других металлов. Ферриты используют для изготовления сердечников катушек индуктивности внутренних антенн.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Изменяют ли вещества, помещаемые в магнитное поле, индукцию этого поля? Приведите примеры.
2. Что такое магнетики? Какова их классификация?
3. Какие вещества называют диамагнетиками? Парамагнетиками? Ферромагнетиками? Приведите примеры дела – парамагнетиками ферромагнитных веществ. Какими свойствами они обладают?
4. Насколько отличаются от единицы магнитные проницаемости диамагнетиками, парамагнетиками ферромагнетиков? О чем это свидетельствует?
5. Что называют точкой Кюри?
6. Что называют магнитным гистерезисом? К чему приводит это явление?
7. Что называют коэрцитивной силой?
8. Что называют статической петлей гистерезиса? Какую величину характеризует площадь петли гистерезиса?

Глава 5. Электромагнитная индукция

§ 5. 1. Закон электромагнитной индукции

1. Английский физик М. Фарадей (1791 - 1867) в 1831г открыл, что при любом изменении магнитного потока пронизывающего контур, в последнем возникает электродвижущая сила индукции

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (5. 1)$$

$$[\varepsilon_i] = -\left[\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\right] = \left(\frac{\text{вебер}}{c}\right) = (B)$$

Из этой формулы имеем в СИ:

Если контур содержит N витков, то формулу (5. 1) записывают в виде

$$\varepsilon_{ин} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N \quad (5. 2)$$

Если промежуток времени Δt в течение которого изменяется магнитный поток, является

бесконечно малым, т. е. если $\Delta t \rightarrow 0$, то $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{d\Phi}{dt} = \Phi'$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ (и Φ') – первая производная от Φ по t . Следовательно, в общем случае

$$\varepsilon_{ин} = -\frac{d\Phi}{dt} N = -\Phi' N \quad (5. 3)$$

т. е. ЭДС индукции пропорциональна первой производной от магнитного потока по времени, а также числу витков в контуре (катушке).

Формула (5. 3), так же как и формулы (5. 1) и (5. 2), выражают собой основной закон электромагнитной индукции Фарадея – Максвелла.

При движении незамкнутого контура в магнитном поле с индукцией B в нем также возникает э. д. с. индукции.

Так, для прямоугольного контура

$$\varepsilon_i = -Bl\mathcal{V} \quad (5. 4)$$

где l – сторона контура, \mathcal{V} - скорость его движения, причем $\vec{\mathcal{V}} \perp \vec{B}$.

2. Если контур незамкнут, то тока в нем не будет, но э. д. с. индукции существует. э. д. с. индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

3. В 1834г. профессор Петербургского университета Э. Х. Ленца (1804 - 1865) русский физик установил закономерность в направлении индукционного тока: Индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающего этот ток. Поэтому при возрастании тока в контуре э д с. индукции отрицательно т.е направлена навстречу току контура. При уменьшении тока в контуре э. д. с индукции положительна т.е. имеет то же направление, что и ток контура. Знак минус в законе э. д. с. индукции выражает правило Ленца.

Из формулы (5. 4) видно, что индукционные токи, возникающие в сплошных металлических техниках, находящихся в переменном магнитном поле называют вихревыми токами (или токами Фуко). В технике в вихревым токам отношение двоякое. Их или используют для практических нужд, или же, наоборот, ведут с ними борьбу.

Чем толще проводящее тело, тем больше количество вихревых токов в нем возникает и тем больше они выделяют теплоты. Это позволяет использовать вихревые токи для плавки металлов, для нагревания различных металлических деталей при термической обработке и. т. п. С другой стороны, возникновение вихревых токов в сердечниках трансформаторов генераторов тока и других электрических машин приводит к их нагреванию, т. е. потерям

электроэнергии, снижению КПД. Поэтому для уменьшения подробных вредных явлений сердечники трансформаторов, роторы, статоры генераторов приходится собирать из отдельных тонких изолированных друг от друга пластин.

§ 5. 2. Э.д.с. самоиндукции. Индуктивность

1. Если магнитный поток создается переменным током, текущем в самом рассматриваемом контуре (т.е. пронизывает свой же контур), в нем создается э. д. с. самоиндукции. Магнитный поток Φ , пронизывающий контур, пропорционален току I в контуре: $\Phi = LI$;

При $L = const$, $\Delta\Phi = L\Delta I$, подставив эту формулу в $\varepsilon_{СИ} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ получим

$$\varepsilon_{Cu} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (5. 5)$$

$$L = -\frac{\varepsilon_{Cu}}{\Delta I / \Delta t}$$

где L – коэффициент самоиндукции или индуктивность контура.

2. Единица индуктивности в СИ: Генри (Гн). Это индуктивность такого контура, в котором при изменении силы тока со скоростью $1 \frac{A}{C}$ возникает э.д.с. самоиндукции, равная 1 В.

$$[L] = -\left[\frac{\varepsilon_{Cu}}{\Delta I / \Delta C} \right] = \frac{B}{A/C} = (Гн).$$

Индуктивность контура зависит от его формы, размеров, числа витков.

§ 5. 3. Взаимная индукция. Трансформатор

1. Если две катушки расположены близко друг к другу, то часть магнитного потока первой из катушек $\Phi_{1,2}$ пронизывает витки второй, и наоборот, часть магнитного потока второй катушки $\Phi_{2,1}$, пронизывает витки первой. Так как магнитные потоки прямо

пропорциональны токам, то

$$\Phi_{1,2} = L_{1,2} I_1; \quad \Phi_{2,1} = L_{2,1} \cdot I_2 \quad (5. 6)$$

Причем

$$L_{1,2} = L_{2,1} = M \quad (5. 7)$$

Величина M называется коэффициентом взаимной индукции измеряется в генри (Г). рис. 5. 1

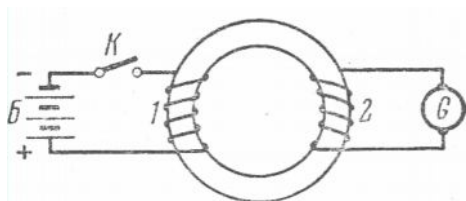


Рис. 5.1

2. Коэффициент взаимной индукции двух однослойных катушек одинаковой длины l , намотанный одна поверх другой и насаженных на замкнутый ферромагнитный сердечник (или равномерно намотанных на тороидальный сердечник), равен.

$$M = \mu\mu_0 n_1 n_2 s l \quad (5. 8)$$

где - n_1 и n_2 число витков на единицу длины каждой катушки; S – среднее сечение витка.

3. На явлении взаимной индукции основано действие трансформатора, который применяется для повышения или понижения напряжения переменного тока. На сердечнике, состоящем из отдельных плит, собранных в замкнутую раму находятся две обмотки – первичная S_1 и вторичная S_2 с числом витков соответственно n_1 и n_2 . Переменный ток I_1 создает в первичной обмотке переменное магнитное поле, которое и является причиной э. д. с. взаимной индукции во вторичной обмотке (рис.5. 2)

понижающий трансформатор. При холостом ходе трансформатора, когда ток во вторичной обмотке отсутствует ($I_2 = 0$) (рис.5. 2), отношение абсолютных значений напряжений u_2 и u_1 на концах вторичной и первичной обмоток называется коэффициентом трансформации:

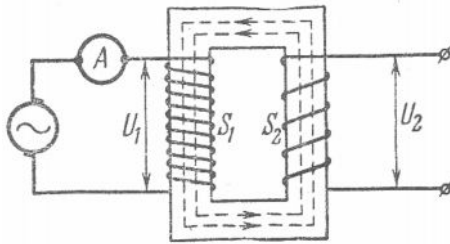


Рис. 5.2

$$\left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \frac{n_2}{n_1} = k \quad (5.9)$$

где $n_1 > n_2$ для понижающего трансформатора.

§ 5.4. Энергия магнитного поля

1. Энергия магнитного поля контура

$$W_m = \frac{I\Phi}{2} = \frac{LI^2}{2} \quad (5.10)$$

2. Энергия однородного магнитного поля, сосредоточенного в объеме однородной и неферромагнитной среде

$$W_m = \frac{1}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V \quad (5.11)$$

3. Объемная плотность магнитного поля однородной неферромагнитной среде (справедлив и для произвольных магнитных полей)

$$w = \frac{1}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \quad (5.12)$$

4. Если одновременно существуют электрическое и магнитное поля то объемная плотность энергии, электромагнитного поля равна сумме объемных плотностей энергий электрического и магнитного полей:

$$w = w_{\text{э}} + w_m = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} \quad (5.13)$$

§ 5.5. Уравнение Максвелла для ЭМП в интегральной и дифференциальной формах

1. Максвелл (1831 - 1879) английский физик использовал (1861) новое понятие – ток смещения, создающая между обкладками конденсатора в цепи переменного тока

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$, $\left(\frac{a}{m^2} \right)$. и может существовать даже когда обкладки конденсатора разделены диэлектриками или находится в вакууме. Максвелл добавил в правую часть закона полного

тока магнитного поля вида $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_s \vec{j} d\vec{s}$ плотность тока смещения $\vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ и записал

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_s \vec{j} d\vec{s} + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{s} = \int_s \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{s}.$$

1 – уравнение Максвелла в интегральной форме.

2. Для перехода к уравнению в дифференциальной форме максвеллом применяется теорема

Стекса (1819 - 1903) английский физик математик $\oint \vec{H} d\vec{l} = \int_s \text{rot} \vec{H} d\vec{s}$, тогда с учетом этого

1 – уравнение Максвелла запишется:

$$\int_S \text{rot} \vec{H} d\vec{s} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{s}, \quad \text{что} \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{пров}} + \vec{j}_{\text{см}} = \vec{j}_{\text{пр}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t};$$

1 – уравнение Максвелла в дифференциальной форме.

3. Второе уравнение Максвелла является обобщением закона индукции Фарадея $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$,

$$\text{где } \varepsilon = \oint_L \vec{E} d\vec{l}, \quad \Phi = \int_S \vec{B} d\vec{s} \quad \text{тогда} \quad \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{s} \quad \text{или} \quad \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

2 – уравнение Максвелла в интегральной форме.

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 2 - \text{уравнение Максвелла в дифференциальной форме.}$$

4. Третье уравнение Максвелла является обобщением закона Гаусса $\oint_S \vec{D} d\vec{s} = q$ для

$$\text{переменного поля как } q = \int_V \rho dV, \quad \text{тогда} \quad \oint_S \vec{D} d\vec{s} = \int_V \rho dV$$

3 – уравнение Максвелла в интегральной форме

$$\text{Третье уравнение Максвелла в дифференциальной форме} \quad \text{div} \vec{D} = \rho$$

5. Четвертое уравнение Максвелла в интегральной форме $\oint_S \vec{B} d\vec{s} = 0$ линии \vec{B} пронизывают замкнутую поверхность S. Четвертое уравнение Максвелла в дифференциальной форме $\text{div} \vec{B} = 0$.

Уравнения Максвелла дополняется еще уравнениями свойства среды:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}$$

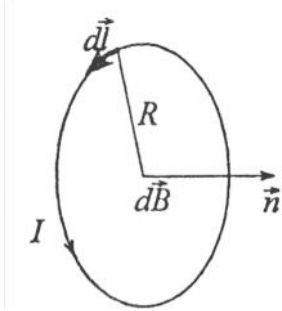
где $\sigma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость, ρ – плотность проводящей среды.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Каким образом возникает э. д. с. индукции? От чего зависит ее значение?
2. Установите единицу магнитного потока в СИ из основного закона электромагнитной индукции и сформулируйте определение этой единицы.
3. Сформулируйте правило Ленца
4. Что такое вихревые токи (токи Фуко)? Приведите примеры их использования в технике. В каких случаях с ними приходится бороться?
5. Поясните явление самоиндукции. От каких величин зависит э. д. с. самоиндукции. Что называют индуктивностью проводника. Выведите единицу индуктивности в СИ и сформулируйте определение этой единицы.
6. От чего зависит индуктивность контура?
7. Что называют трансформатором? На каком явлении основан принцип его действия?
8. Опишите устройство трансформатора. Начертите схему его включения в цепь.
9. Что называют коэффициентом трансформации?
10. Что называется коэффициентом полезного действия (КПД) трансформатора?
11. Записать уравнения Максвелла в интегральной форме.
12. Записать уравнения Максвелла в дифференциальной форме.
13. Записать уравнения свойства среды.

Решение типовых задач

11. 2. найти напряженность H магнитного поля в центре кругового проволочного витка радиусом $R = 1 \text{ см}$, по которому течет ток $I = 1 \text{ А}$.



Решение:

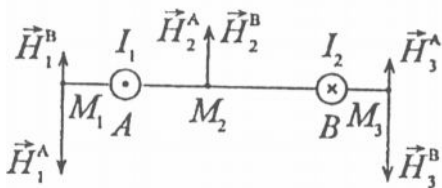
Каждый элемент тока создает в центре индукцию, направленную вдоль положительной нормали к контуру. Поэтому векторное сложение $d\vec{B}$ сводится к сложению их модулей. По закону Био – Савара – Лапласа
$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{R^2}$$

Поэтому проинтегрируем это выражение по всему контуру:

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \oint dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} 2\pi R = \frac{\mu\mu_0}{2R} I$$

Поскольку $B = \mu\mu_0 H$, то $H = \frac{I}{2R}$. Подставляя числовые данные, получим $H = 50 \text{ А/м}$.

11. 3. На рисунке изображены сечения двух прямолинейных бесконечно длинных проводников с токами. Расстояние между проводниками $AB = 10 \text{ см}$, токи $I_1 = 20 \text{ А}$ и $I_2 = 30 \text{ А}$. Найти напряженности H магнитного поля, вызванного токами I_1 и I_2 в точках M_1 , M_2 и M_3 . Расстояния $M_1A = 2 \text{ см}$, $AM_2 = 4 \text{ см}$ и $BM_3 = 3 \text{ см}$.



Решение:

Согласно принципу суперпозиции напряженности \vec{H}_1 , \vec{H}_2 и \vec{H}_3 магнитного поля в точках M_1 , M_2 и M_3 складываются из напряженностей, создаваемых токами I_1 и I_2 .
$$\vec{H}_1 = \vec{H}_1^A - \vec{H}_1^B; \quad \vec{H}_2 = \vec{H}_2^A + \vec{H}_2^B; \quad \vec{H}_3 = \vec{H}_3^A - \vec{H}_3^B$$

Напряженность $H = \frac{I}{2\pi a}$ где a - расстояние от проводника с током до точки, в которой

определяется напряженность.

Тогда

$$H_1^A = \frac{I_1}{2\pi \cdot M_1A} = 159,2 \text{ А/м};$$

$$H_1^B = \frac{I_2}{2\pi \cdot (AB + M_1A)} = 39,8 \text{ А/м};$$

$$H_2^A = \frac{I_1}{2\pi \cdot M_2A} = 79,6 \text{ А/м};$$

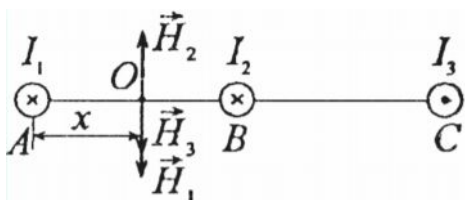
$$H_2^B = \frac{I_2}{2\pi \cdot (AB + M_2A)} = 79,6 \text{ А/м};$$

$$H_3^A = \frac{I_1}{2\pi \cdot (AB + M_3B)} = 24,5 \text{ А/м};$$

$$H_3^B = \frac{I_2}{2\pi \cdot M_3B} = 159,2 \text{ А/м}. \text{ Отсюда, с учетом рисунка, } \vec{H}_1 = \vec{H}_1^A - \vec{H}_1^B = 119,4 \text{ А/м};$$

$$\vec{H}_2 = \vec{H}_2^A + \vec{H}_2^B = 159,2 \text{ А/м}; \quad \vec{H}_3 = \vec{H}_3^A - \vec{H}_3^B = 134,7 \text{ А/м}.$$

11. 5. На рисунке изображены сечения двух прямолинейных бесконечно длинных проводников с токами. Расстояние $AB = BC = 5 \text{ см}$, токи $I_1 + I_2 = I$ и $I_3 = 2I$. Найти точку на прямой AC , в которой напряженность магнитного поля, вызванного токами I_1 , I_2 и I_3 , равна нулю.



Решение:

Искомая точка не может находиться на отрезке BC , т. к. векторы \vec{H}_1 , \vec{H}_2 и \vec{H}_3 здесь направлены в одну сторону

и их сумма не может быть равной нулю. Тогда точка с нулевой напряженностью магнитного поля находится на отрезке AB на расстоянии x от точки A . Направления векторов \vec{H}_1 , \vec{H}_2 и \vec{H}_3 показаны на рисунке. По условию $\vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3 = 0$, следовательно $\vec{H}_1 + \vec{H}_3 = -\vec{H}_2$ -

(2). Напряженность магнитного поля $H = \frac{I}{2\pi a}$, где a - расстояние от проводника с током до

точки, в которой определяется напряженность. Тогда $H_1 = \frac{I}{2\pi x}$ - (2); $H_2 = \frac{I}{2\pi(AB-x)}$ - (3);

$H_3 = \frac{2I}{2\pi(BC+AB-x)}$ - (4). Подставив в (2) - (4) известные числовые данные, а затем

подставив эти уравнения в (1), получим $\frac{I}{2\pi x} + \frac{2I}{2\pi(0,1-x)} = \frac{I}{2\pi(0,05-x)}$. Разделив уравнение

на $\frac{I}{2\pi}$, получим $\frac{1}{x} + \frac{2}{0,1-x} = \frac{1}{0,05-x}$. Решив данное уравнение, найдем $x = 0,033$ м. Т. е.

точка O находится между точками I_1 и I_2 на расстоянии 3,3 см от точки A .

11. 17. Найти напряженность H магнитного поля на оси кругового контура на расстоянии $a = 3$ см от его плоскости. Радиус контура $R = 4$ см, ток в контуре $I = 2$ А.

Решение:

Выберем элемент тока $I d\vec{l}$. В точке A он создает поле $d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$. В силу симметрии

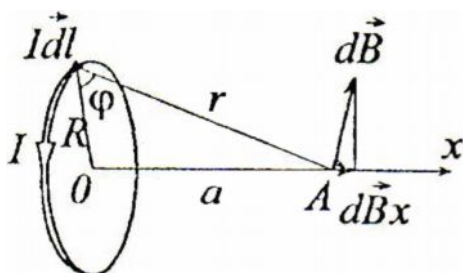
суммарный вектор \vec{B} направлен вдоль оси x , а это значит, что для нахождения модуля вектора надо сложить проекции всех векторов $d\vec{B}$ на ось Ox .

$dB_x = dB \cos \varphi = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I_0 dl}{r^3} \cos \varphi$. Интегрируя это выражение по всем dl , что дает $2\pi R$, и

учитывая, что $\cos \varphi = \frac{R}{r}$, $r = (a^2 + R^2)^{\frac{1}{2}}$, получаем $B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(a^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$. Поскольку

$B = \mu\mu_0 H$, то $H = \frac{R^2 I}{2(a^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$; $H = 12,7$ А/м.

11. 28. Обмотка катушки сделана из проволоки диаметром $d = 0,8$ мм. Витка плотно прилагает друг к другу. Считая катушку достаточно длинной, найти напряженность H магнитного поля внутри катушки при токе $I = 1$ А.



Решение:

Внутри катушки напряженность поля $H = In$, где n - число витков на единицу длины, равно $\frac{1}{d}$. Отсюда

$H = \frac{1}{d} = 1,25$ кА/м.

11. 29. Из проволоки диаметром $d = 1$ мм надо намотать соленоид, внутри которого должна быть напряженность магнитного поля $H = 24$ кА/м. По проволоке можно пропускать,

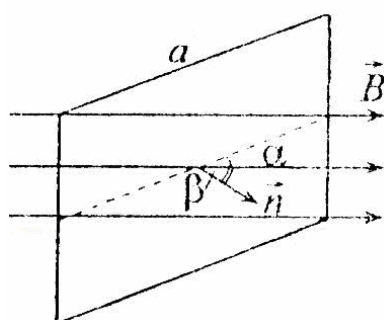
пределный ток $I = 6 \text{ А}$. Из какого числа слоев будет состоять обмотка соленоида, если витки наматывать плотно друг к другу? Диаметр катушки считать малым по сравнению с ее длиной.

Решение:

Если обмотка состоит из одного слоя, то напряженность внутри катушки $H_1 = \frac{I}{d} = 6 \text{ кА/м}$

(см. задачу 11. 28). Необходимое число слоев $N = \frac{H}{H_1} = 4$.

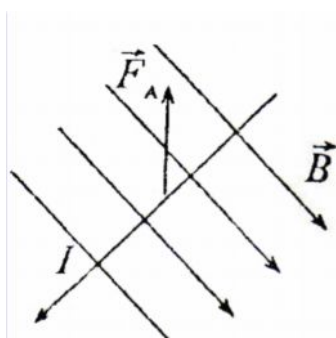
11. 36. В однородном магнитного поля напряженностью $H = 79,6 \text{ кА/м}$ помещена квадратная рамка, плоскость которой составляет с направлением магнитного поля $\alpha = 45^\circ$. Сторона рамки $a = 4 \text{ см}$. Найти магнитный поток Φ , пронизывающий рамку.



Решение:

Магнитного поток $\Phi = \vec{B}\vec{S} = BS \cos \beta$, где β - угол между направлением магнитного поля и нормалью к плоскости рамки. Имеет $S = a^2$; $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$, $B = \mu\mu_0 H$. Отсюда $\Phi = \mu\mu_0 a^2 \cos 45^\circ = 113 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$.

11. 55. Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$. По проводу длиной $l = 70 \text{ см}$, помещенному перпендикулярно к направлению магнитного поля, течет ток $I = 70 \text{ А}$. Найти силу F , действующую на провод.



Решение:

На элемент длины $d\vec{l}$ проводника с током I в магнитном поле с индукцией \vec{B} действует сила Ампера $d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}]$. Направление этой силы определяется по правилу векторного произведения векторов. Модуль силы Ампера вычисляется по формуле $dF = IBdl \sin \alpha$, где α - угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{B} . Поскольку $\sin \alpha = 1$, то $dF = IBdl$ или $F = IB \int_0^l dl = IBl$.

Подставляя числовые данные, получим $F = 4,9 \text{ Н}$.

11. 56. Два прямолинейных длинных параллельных проводника находятся на расстоянии $d_1 = 10 \text{ см}$ друг от друга. По проводниками в одном направлении текут токи $I_1 = 20 \text{ А}$ и $I_2 = 30 \text{ А}$. Какую работу A_1 надо совершить (на единицу проводников), чтобы раздвинуть эти проводники до расстояния $d_2 = 20 \text{ см}$?

Решение:

Согласно закону Ампера для параллельных токов сила, действующая на единицу длины каждого из проводников, $F = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r}$. Работа, затрачиваемая на единицу длины проводника, при перемещении одного проводника с током в магнитном поле, создаваемом

другим проводником с током, $A = \int_{d_1}^{d_2} F dr = \int_{d_1}^{d_2} \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} dr = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}$. Подставляя

числовые данные, получим $A = 83 \cdot 10^{-6}$ Дж / м.

11. 57. Два прямолинейных длинных параллельных проводника находятся на некотором расстоянии друг от друга. По проводниками текут одинаковые токи в одном направлении. Найти токи I_1 и I_2 , текущие по каждому из проводников, если известно, что для того, чтобы раздвинуть эти проводники на вдвое большее расстояние, пришлось совершить работу (на единицу длины проводников) $A_1 = 55$ мк Дж / м.

Решение:

Имеем $A_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}$ (см. Задачу 11. 56). По условию $I_1 = I_2 = I$ и $d_2 = 2d_1$ тогда

$$A_1 = \frac{\mu\mu_0 I^2}{2\pi} \ln 2. \text{ Отсюда } I = \sqrt{\frac{2\pi A_1}{\mu\mu_0 \ln 2}} = 20 \text{ А}, \text{ т. е. } I_1 = I_2 = 20 \text{ А}.$$

11. 58. Из проволоки длиной $l = 20$ см сделаны квадратный и круговой контуры. Найти вращающие моменты сил M_1 и M_2 , действующие на каждый контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. По контурам течет ток $I = 2$ А. Плоскость каждого контура составляет угол $\alpha = 45^\circ$ с направлением поля.

Решение:

На замкнутый контур с током в магнитном поле действует вращательный момент

$M = BIS \sin \alpha$. Площадь квадратного контура $S_1 = \left(\frac{l}{4}\right)^2$. Площадь квадратного контура

$S_2 = \pi R^2$, где $R = \frac{l}{2\pi}$, следовательно, $S_2 = \frac{l^2}{4\pi}$. Тогда на квадратный контур действует

вращательный момент $M_1 = \frac{BIl^2}{16} \sin \alpha$; $M_1 = 3,5 \cdot 10^{-4}$ Н · м. На круговой контур действует

вращательный момент $M_2 = \frac{BIl^2}{4\pi} \sin \alpha$; $M_2 = 4,5 \times 10^{-4}$ Н · м.

11. 68. Найти магнитный поток Φ , пересекаемый радиусом ab диска A (см. рисунок к задаче 11.66) за время $t = 1$ мин вращения. Радиус диска $R = 10$ см. Индукция магнитного поля $B = 0,1$ Тл. Диск вращается с частотой $n = 5,3 \text{ с}^{-1}$.

Решение:

Угол, на который повернется диск за время t при равномерном вращении с частотой n ,

равен $\varphi = \omega t = 2\pi n t$. Из геометрии площадь кругового сектора $S = \frac{1}{2} R^2 \varphi$, тогда площадь,

пронизываемая магнитным потоком за время t , равна $S = R^2 \pi n t$. Следовательно, магнитный поток через площадь S за время t равен $\Phi = BS = BR^2 \pi n t = 1 \text{ Вб}$.

11. 69. Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U = 1 \text{ кВ}$, влетает в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к направлению его движения. Индукция магнитного поля $B = 1,19 \text{ мТл}$. Найти радиус R окружности, по которой движется электрон, период обращения T и момент импульса M электрона.

Решение:

Со стороны магнитного поля на электрон действует сила Лоренца $\vec{F}_L = -e[\vec{v}, \vec{B}]$. Направление силы Лоренца определяется по правилу векторного произведения векторов. В скалярном виде $\vec{F}_L = evB \sin \alpha = evB$, т. к. $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Поскольку начальная скорость электрона

перпендикулярна \vec{B} , то его траектория лежит в одной плоскости. Работа силы Лоренца равна нулю, поэтому $v = \text{const}$. Электрон движется с постоянным по модулю ускорением $a = \frac{F_o}{m} = \frac{eBv}{m}$ - (1), которое перпендикулярно скорости. Радиус кривизны траектории

электрона можно найти из соотношения $a = \frac{v^2}{R}$ - (2). Приравняв (1) и (2), получим

$\frac{eBv}{m} = \frac{v^2}{R}$, откуда $R = \frac{mv}{eB}$. Период обращения электрона по окружности не зависит от

скорости: $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{eB}$. Момент импульса электрона $\vec{M} = m[\vec{v}, \vec{R}]$ или, поскольку вектора

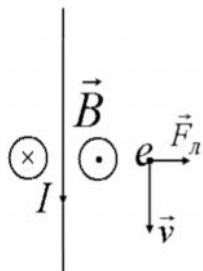
\vec{v} и \vec{R} перпендикулярны, $M = mvR$. Скорость электрона найдем из соотношения $\frac{mv^2}{2} = eU$,

откуда $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$. Отсюда $M = R\sqrt{2eUm}$. Подставляя числовые данные, получим

$R = 0,09 \text{ м}$; $T = 30 \cdot 10^{-9} \text{ с}$; $M = 1,5 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$.

11. 70. Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U = 300 \text{ В}$, движется параллельно прямолинейному длинному проводу на расстоянии $a = 4 \text{ мм}$ от него. Какая сила F действует на электрон, если по проводнику пустить ток $I = 5 \text{ А}$?

Решение:



Со стороны магнитного поля, создаваемого проводником с током, на электрон действует сила Лоренца $\vec{F} = -e[\vec{v}, \vec{B}]$. Направление силы Лоренца определяется по правилу векторного произведения векторов. В скалярном виде $F = evB \sin \alpha$ - (1).

Индукция магнитного поля проводника с током равна $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi a}$ - (2).

Кинетическая энергия электрона, прошедшего разность потенциалов U ,

равна $\frac{mv^2}{2} = eU$, откуда $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ - (3). Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$F = e\sqrt{\frac{2eU}{m}} \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi a}$. Подставляя числовые данные, получим $F = 4,12 \cdot 10^{-16} \text{ Н}$.

11. 72. Электрон влетает в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к направлению его движения. Скорость электрона $v = 4 \cdot 10^7 \text{ м/с}$.

Индукция магнитного поля $B = 1 \text{ мТл}$. Найти тангенциальное a_τ и нормальное a_n ускорения электрона в магнитном поле.

Решение:

На электрон в магнитном поле действует сила Лоренца $\vec{F} = -e[\vec{B} \times \vec{v}]$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - элементарный заряд. В скалярном виде $F = eBv \sin \alpha$. Эта сила сообщает электрону ускорение \vec{a} . Тогда по второму закону Ньютона $F = ma$. Тангенциальное ускорение $a_\tau = 0$, т. к. вектор \vec{v} перпендикулярен вектору \vec{B} . Нормальное ускорение $a_n = \frac{F}{m} = \frac{eBv}{m} = 7 \cdot 10^{15} \text{ м/с}^2$.

11. 93. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$ движется проводник длиной $l = 10 \text{ см}$. Скорость движения проводника $v = 15 \text{ м/с}$ и направлена перпендикулярно к магнитному полю. Найти индуцированную в проводнике э. д. с. ε .

Решение:

Э. д. с. индукции определяется по закону Фарадея: $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$. В этом уравнении знак «минус» соответствует правилу Ленца. Поскольку $d\Phi = BdS = Bl dx$, то $\varepsilon = Bl \frac{dx}{dt} = Blv = 0,15 \text{ В}$.

11. 94. Катушка диаметром $D = 10 \text{ см}$, состоящая из $N = 500$ витков проволоки, находится в магнитном поле. Найти среднюю э. д. с. индукции ε_{cp} , возникающую в этой катушке, если индукция магнитного поля увеличивается в течение времени $t = 0,1 \text{ с}$ от 0 до 2 Тл.

Решение:

Согласно закону Фарадея $\varepsilon_{cp} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, где изменение потока магнитной индукции через катушку $\Delta\Phi = NS\Delta B$. Следовательно, $\varepsilon_{cp} = NS \frac{\Delta B}{\Delta t}$, где $\Delta B = B_2 - B_1$. По условию $B_1 = 0$, $B_2 = 2 \text{ Тл}$. Подставляя числовые данные, получим $\varepsilon_{cp} = 78,5 \text{ В}$.

11. 96. В магнитном поле, индукция которого $B = 0,05 \text{ Тл}$, вращается стержень длиной $l = 1 \text{ см}$ с угловой скоростью $\omega = 20 \text{ рад/с}$. Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна магнитному полю. Найти э. д. с. индукции ε , возникающую на концах стержня.

Решение:

Согласно закону Фарадея $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ - (1), где изменение магнитного потока $\Delta\Phi = B\Delta S \sin \alpha$ или, поскольку $\alpha = 90^\circ$, $\Delta\Phi = B\Delta S$. За один оборот стержень пересекает площадь $\Delta S = \pi l^2$ за время $\Delta t = t$. Тогда магнитный поток, пересекаемый стержнем за один оборот, $\Phi = B\pi l^2$, а возникающая на концах стержня э. д. с. $\varepsilon = \frac{B\pi \cdot l^2}{t} = B\pi l^2 n = \frac{Bl^2 \omega}{2}$. Подставляя числовые данные, получим $\varepsilon = 0,5 \text{ В}$.

11. 102. Горизонтальный стержень длиной $l = 1 \text{ м}$ вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через один из его концов. Ось вращения параллельна магнитному полю, индукция которого $B = 50 \text{ мкТл}$. При какой частоте вращения n стержня разность потенциалов на концах этого стержня $U = 1 \text{ мВ}$?

Решение:

Согласно закону Фарадея $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ - (1), где изменение магнитного потока $\Delta\Phi = B\Delta S$ - (2),

где площадь, покрываемая сечением стержня за один оборот, равна $\Delta S = \pi l^2$ - (3). Подставив

(3) в (2), а затем (2) в (1), получим $\varepsilon = \frac{B\pi l^2}{\Delta t}$. Здесь Δt - время одного оборота. Отсюда

$n = \frac{1}{\Delta t} = \frac{\varepsilon}{B\pi l^2}$. Подставляя числовые данные, получим $n = 6,4 \text{ с}^{-1}$

11. 113. Сколько витков имеет катушка, индуктивность которой $L = 1 \text{ мГн}$, если при токе $I = 1 \text{ А}$ магнитный поток сквозь катушку $\Phi = 2 \text{ мкВб}$?

Решение:

Магнитный поток сквозь катушку равен $N\Phi = LI$, откуда $N = \frac{LI}{\Phi} = 500$.

Глава 6. Механические колебания и волны

§ 6. 1. Гармонические колебания

1. В природе и технике широко распространены колебательные движения. Примерами колебательного движения в механике могут служить колебания маятников, струн, мембран телефонов, мостов и других сооружений подвергающихся переменной нагрузке и. т. д. Колебательными движениями являются движения или изменения состояния, обладающие

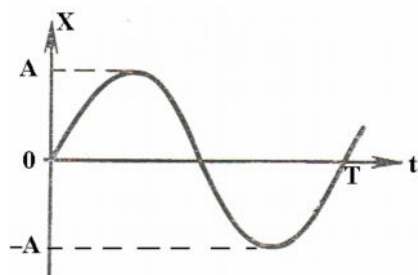


Рис. 6.1

той или иной степенью повторяемости во времени. Колебательное движение называют периодическим, если значения физических величин, изменяющихся в процессе колебаний повторяются через равные промежутки времени. Простейшим типом периодических колебаний являются гармонические колебания. Колебания какой – либо физической величины X называются гармоническими, если ее зависимость от времени t имеет вид (рис. 6. 1)

$$X = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (6. 1)$$

или

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (6. 2)$$

Причем A , φ_0 и φ_1 с течением времени t не изменяются – постоянные величины, причем $A > 0$, величина A , равная наибольшему абсолютному значению колеблющейся физической величины X , называется амплитудой колебания. Выражение $\omega t + \varphi_0 = \phi$ определяет значение X в данной момент времени и называется фазой колебания. В момент начала отсчета времени ($t=0$) фаза равна начальной фазе φ_0 . Иногда вместо зависимости

(6. 1) используется выражение (6. 2) отличающееся от (6. 1) начальной фазой $\varphi_1 = \varphi_0 - \frac{\pi}{2}$,

$$\text{(или } \varphi_0 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2} \text{)}$$

2. Периодом колебания называется тот наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех величин, характеризующих колебательное движение. За это время совершается одно полное колебание. Частотой периодических колебаний ν называется число полных колебаний, которые совершаются за единицу времени:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (6. 3)$$

циклической (круговой) частотой периодических колебаний ω называется число полных колебаний которые совершаются за 2π единиц времени:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (6. 4)$$

от куда

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (6. 5)$$

3. Скорость и ускорение гармонического колебание. Под модулем ν скорости гармонического колебания точки, в соответствии с определением скорости, понимается изменение ΔX абсолютного значения смещения x за достаточной малый промежуток

времени: $\nu = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t}$.

Скорость гармонического колебания, описываемого уравнением (6. 1)

$$\nu = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0) = \nu_{\text{макс}} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (6. 6)$$

где $\nu_{\text{макс}} = \omega A$ есть амплитуда скорости, пропорциональная циклической частоте и амплитуде смещения A .

4. Под модулем ускорения a гармонического колебания точки в соответствии с определением ускорения понимается $\Delta \nu$ изменения скорости гармонического колебания за

достаточно малый промежуток времени: $\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \nu}{\Delta t}$.

Ускорение гармонического колебания, описываемого уравнением (6.1)

$$a = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -a_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x \quad (6. 7)$$

или

$$a = a_0 \sin(\omega t + \pi + \varphi_0) \quad (6. 8)$$

Такие гармонические колебания называются собственными или свободными.

§ 6. 2. Сложение гармонических колебаний, одного направление и одинаковой частоты

1. Пусть точка одновременно участвует в двух гармонических колебаниях одинакового периода, направленных вдоль одной прямой. Сложение этих колебаний удобно производить, пользуясь методом векторных диаграмм. Пусть колебания заданы уравнениями:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \text{ или } x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (6. 9)$$

2. Так как колебания совершаются вдоль одной прямой, то и результирующие колебания будут происходить вдоль этой же прямой.

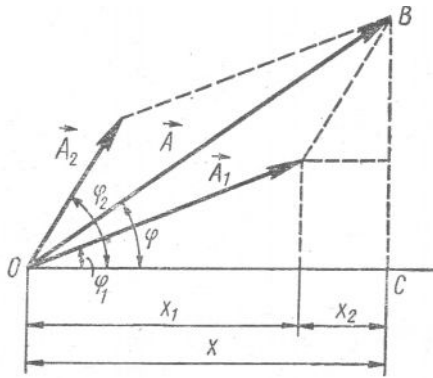


Рис. 6.2

Отложим из точки O опорной линии OX под углом φ_1 вектор амплитуды \vec{A}_1 и под углом φ_2 вектор амплитуды \vec{A}_2 (рис. 6. 2). Оба вектора вращаются против часовой стрелки с одинаковой угловой скоростью ω , поэтому угол $\varphi_2 - \varphi_1$ между ними все время остается неизменным. Результирующие колебания изображается вектором амплитуды \vec{A} , равным сумме векторов \vec{A}_1 и \vec{A}_2 : $\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2$ и вращающимся и вокруг точки OC той же угловой

скоростью ω , что и векторы \vec{A}_1 и \vec{A}_2 . Результирующие колебания должны быть гармоническими с циклической частотой ω :

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (6. 10)$$

где A – амплитуда результирующих колебаний, а φ - их начальная фаза.

3. Из рис 6. 2 видно, что квадрат амплитуды результирующих колебаний равен.

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (6. 11)$$

$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$ а начальная фаза φ определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{BC}{OC}, \text{ или } \operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \quad (6. 12)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

4. Из выражения (6. 11) следует, что амплитуда A результирующих колебаний зависит от разности начальных фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ складываемых колебаний т. к. разность $\varphi_2 - \varphi_1$ с течением времени не изменяется (такие синхронные колебания называют когерентными), то по формуле (6. 11) можно получить определенное значение амплитуды A .

Косинус любого угла не может быть больше +1 и меньше -1. Следовательно, значения A заключены в пределах:

$$A_1 + A_2 \geq A \geq |A_2 - A_1| \quad (6. 13)$$

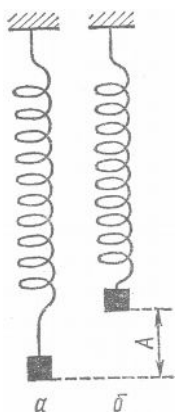
Рассмотрим два частных случая, имеющих важное значение при объяснении интерференции волн.

1. Пусть $\varphi_2 - \varphi_1 = 2K\pi$ ($K=0,1,2,\dots$). В этом случае $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = +1$ и формула 6. 11 примет вид: $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2$ или $A = A_1 + A_2$ и так, если разность фаз слагаемых колебаний равна нулю или кратка 2π , то амплитуда результирующего колебания равна сумме амплитуд слагаемых колебаний.

2. Пусть теперь $\varphi_2 - \varphi_1 = (2K + 1)\pi$ ($K=0,1,2,\dots$) т. к при этом $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ то из форм. 6. 11 получаем; $A = |A_2 - A_1|$. Знак модуля поставлен потому, что амплитуда – величина положительная, тогда как разность A_2A_1 может быть и отрицательной.

§ 6. 3. Энергия гармонического колебательного движения

1. При гармонических колебаниях пружинного маятника (рис 6. 4) происходят превращения



потенциальной энергии упруго деформированного тела $E_n = \frac{kx^2}{2}$ в его

кинетическую энергию $E_k = \frac{mv^2}{2}$ где k – жесткость пружины,

x – абсолютное значение смещения маятника из положения равновесия, m – масса маятника, v – его скорость.

В соответствии с (6. 1) и (6. 6) имеем:

$$E_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0) \quad (6. 14)$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0) \quad (6. 15)$$

Рис. 6.2

2. Полная энергия E пружинного маятника:

$$\begin{aligned} E &= \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{m\omega^2 A^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0) = \\ &= \frac{m\omega^2 A^2}{2} [\sin^2(\omega t + \varphi_0) + \cos^2(\omega t + \varphi_0)] = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \end{aligned} \quad (6. 16)$$

Согласно закону Гука $F = -kx$ и второму закону Ньютона $F = ma = mx''$. Приравнявая их с учетом $\frac{k}{m} = \omega_0^2$ имеем

$$x'' = -\omega_0^2 x \quad (6. 17)$$

Это есть уравнение свободных колебаний пружинного маятника.

§ 6. 4. Математический и физический маятники

1. Математическим маятником называют, материальную точку, подвешенную на невесомой, нерастяжимой нити и совершающую колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести. При отклонении маятника на угол α из положения равновесия (рис. 6. 4)

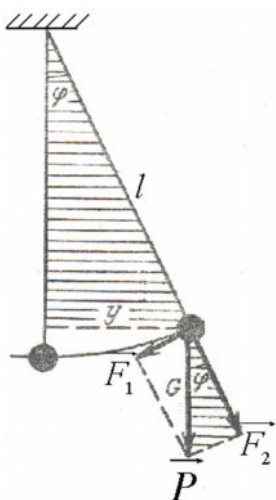


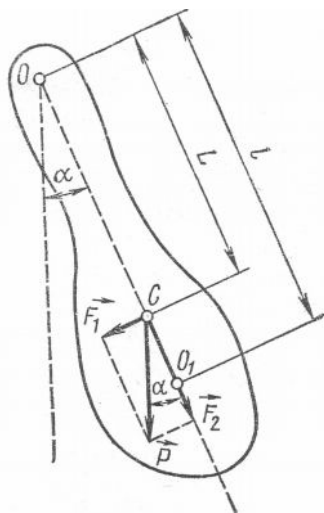
Рис. 6. 2

силу тяжести маятника \vec{P} можно разложить на две составляющие \vec{F}_1 и \vec{F}_2 направленные соответственно, перпендикулярно к нити и вдоль нее.

где \vec{F}_2 вызывает натяжение нити, а \vec{F}_1 стремится вернуть маятник в положения равновесия ($\alpha = 0$). Маятник будет совершать колебательное движение. Период колебаний математического маятника при малых отклонениях ($\alpha = 5^\circ$) равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (6. 18)$$

2. Физическим маятником называют абсолютно твердое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести вокруг горизонтальной оси O не проходящей через его центр тяжести (рис. 6. 3)



где c – центр масс расстояние $OC = L$. Пусть маятник отклонен из положения равновесия на небольшой угол α .

Составляющая F_2 силы тяжести маятника \vec{P} направленная вдоль OC уравнивается реакцией оси O . Составляющая \vec{F}_1 перпендикулярная к OC , стремится возвратить маятник в положения равновесия. Период физического маятника определяется

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{j}{mgL}} \quad (6.19)$$

где $j = ml^2$ - момент инерции маятника относительно оси и O

Рис. 6.3

3. Приведенной длиной физического маятника называется длина такого математического маятника, который колеблется синхронно с физическим, т.е имеет равный с ним период колебаний. Для нахождения приведенной длины l приравняем правые части формул (6. 18) и (6. 19):

$$2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{j}{mgL}} \quad \text{откуда } l = \frac{j}{mL} \quad (6. 20)$$

§ 6.5. Затухающие колебания

1. Все реальные колебания являются диссипативными (рассеивающими энергии). Энергия

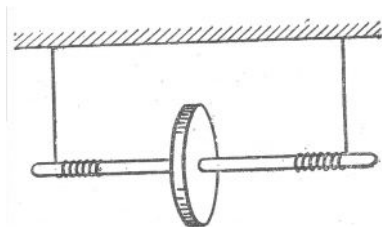


Рис. 6.6

механических колебаний такой системы постепенно расходуется на работу против сил трения, поэтому свободные колебания всегда затухают – их амплитуда постепенно уменьшается. Это можно наблюдать на опыте с маятником Дж Максвелла, представляющим собой диск, ось которого подвешена на двух накручивающихся на нее нитях (рис. 6. 6).

Под действием силы тяжести маятник Максвелла совершает колебания в вертикальном направлении и вместе с тем

крутильные колебания вокруг своей оси. Закрутив маятник, мы приподнимаем его на высоту H над положением равновесия (условным нулевым уровнем) и сообщаем ему потенциальную энергию mgH . Опустившись до положения равновесия, маятник, энергия которого перешла теперь в кинетическую, не остановится, а начнет опять подниматься, нити будут вновь накручиваться на ось. Однако маятник поднимается теперь на меньшую высоту, так как часть его энергии израсходовалась на преодоление сопротивления.

Примером негармонических колебаний является колебания пружинного маятника в реальных условиях, т. Е. При действии сил трения и сопротивления среды. В этом случае энергия колебаний постепенно расходуется, амплитуда уменьшается и колебания затухают (рис. 6. 7). Таким образом, свободные колебания могут быть и затухающими.

Степень затухания характеризуют декрементом. Это отношение амплитуд колебаний в моменты времени t и $t+T$. Чем быстрее затухают колебания, тем больше декремент. За меру затухания берут логарифмический декремент затухания

$$\Delta = \ln \frac{At}{A_{t+T}} = \delta \cdot T \quad (6.20)$$

2. Амплитуда затухающих колебаний убывает с течением времени по закону

$$A(t) = A_0 e^{-\delta t} \quad (6.21)$$

где A_0 - начальная амплитуда колебаний в момент времени $t=0$, определяемая начальным запасом полной энергии колеблющегося тела, e – основание натуральных логарифмов, δ - коэффициент затухания, характеризующий быстроту убывания амплитуды, зависящий от сил трения и массы колеблющегося тела,

$$\delta = \frac{r}{2m} \quad (6.22)$$

3. Период затухающих колебаний вычисляется по формуле

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \quad (6.23)$$

где ω_0 - собственная частота свободных незатухающих колебаний. Величина

$$\omega_{зам} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (6.24)$$

называется циклической частотой затухающих колебаний.

4. При условии $\delta < \omega_0$ затухающие колебания описываются уравнением

$$x = A_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_{зам} \cdot t + \varphi_0) \quad (6.25)$$

где φ_0 - начальная фаза колебаний. На рис. 6.7 изображена зависимость x от t .

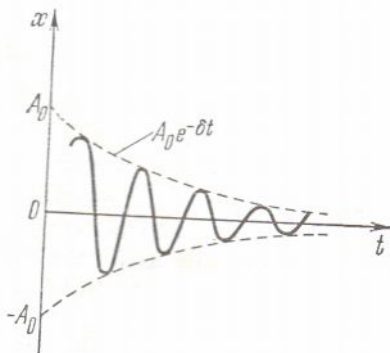


Рис. 6.7

§ 6. 6. Вынужденные колебания

1. Вынужденными колебаниями называются незатухающие колебания системы, которые вызываются действием на нее внешних сил $F(t)$, периодически изменяющихся с течением времени. Вынужденными являются колебания силы тока в сети переменного тока, колебания гребных винтов, лопаток и валов турбин под действием периодически изменяющихся внешних сил. Сила $F(t)$, вызывающая вынужденные колебания, называется возмущающей (вынуждающей силой).

2. Если возмущающая сила $F(t)$ изменяется гармонически по закону

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (6.26)$$

где F_0 - амплитуда возмущающей силы, ω - ее циклическая частота, то в системе, на которую действует такая сила, могут установиться вынужденные колебания также гармоническими и описываются уравнением,

$$X = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (6.27)$$

Здесь A – амплитуда вынужденных колебаний, смещениях x , φ_1 – разность фаз между x и силой $F(t)$

3. Амплитуда A вынужденных колебаний определяется по формуле

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \varphi\beta^2\omega^2}} \quad (6.28)$$

где F_0 – амплитуда вынуждающей силы, m – масса колеблющейся системы, ω_0 – циклическая частота свободных незатухающих колебаний системы, ω – циклическая частота внешней силы, δ – коэффициент затухания.

И так, при действии на систему вынуждающей силы $F = F_0 \cos \omega t$ возникают вынужденные колебания

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (6.29)$$

4. Явления возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении циклической частоты вынуждающей силы к значению $\omega_{рез}$ называется резонансом. Соответственно величина $\omega_{рез}$ называется резонансной циклической частотой. В различных сооружениях и машинах, резонанс весьма опасен. Он может вызывать их разрушение в следствие значительного возрастания амплитуды колебаний. Резонанс приходится учитывать при конструировании машин и различных сооружений, чтобы не возникало резких резонансных явлений ни во всей установке, ни в ее отдельных частях.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Какое колебательное движение называют периодическим?
2. Какие колебания называют гармоническими? Привести примеры.
3. Объясните понятия периода колебаний, частоты и циклической частоты, назовите их единицы.
4. Объясните понятия фазы и начальной фазы.
5. Что являются причинами свободных колебаний пружинного маятника?
6. Докажите (например с маятником), что скорость и ускорение при гармоническом колебании изменяются по закону синуса (косинуса). Выведите формулу полной энергии маятника.
7. Чем отличаются математический и физический маятники?
8. Чем отличаются собственные колебания от вынужденных?
9. По какой формуле определяется амплитуда вынужденных колебаний?
10. Что такое резонанс и учет резонансных явлений в производстве.

§ 6. 7. Механические (упругие) волны

1. Механическая волна представляет собой колебательный процесс в упругой **среде**. Такая среда состоит из большого числа связанных друг с другом частиц, совершающих колебания.

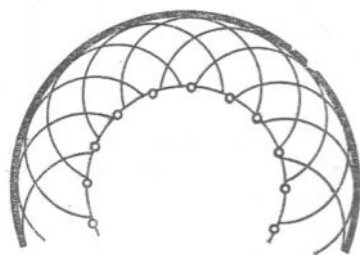


Рис. 6.8

Если возбуждаются колебания одной из частиц, то она становится центром распространяющейся волны. Кинематическим признаком волнового движения служит распространение фазы колебаний, динамическим – перенос энергии. Скорость обеих этих процессов представляет собой фазовую скорость, или скорость распространения волны.

2. Распространение волн легко понять и объяснить, если обратиться к принципу Гюйгенса (1629 - 1695) – голландский физик, математик и астроном, в 1690г

объясняя механизм распространения волны и известные из опыта законы отражения и преломления выдвинул принцип:

Каждая точка среды, вовлеченная в волновое движение, становится источником новой волны, называемой элементарной волной (рис. 6. 8)

3. Наблюдаемый волновой фронт представляет собой результат сложения множества элементарных волн. Принцип Гюйгенса справедлив для всех видов волн, в том числе и для электромагнитных.

4. **Типы волн.** Волны, у которых направление скорости движения частиц перпендикулярно направлению фазовой скорости, называются поперечными волнами.

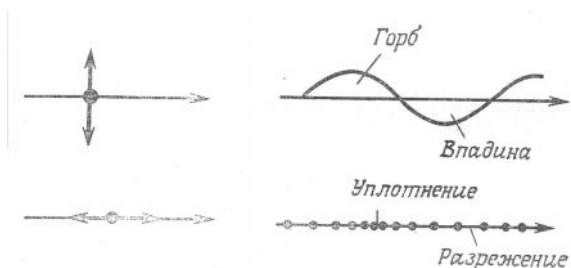


Рис. 6.9

У этих волн происходит чередование **горбов** и **впадин**. Если направления скорости колебаний и фазовой скорости совпадают, то волны называются **продольными**. У этих волн чередуются области сгущения и разрежения (рис. 6. 9)

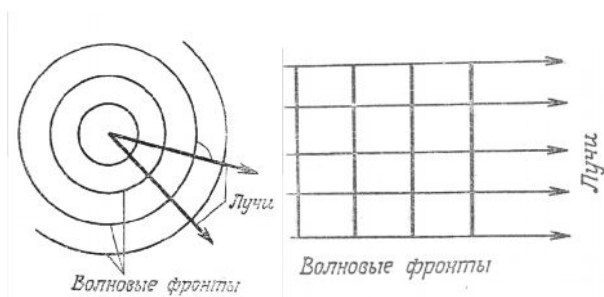


Рис. 6.10

Направление распространения волны называют **лучом**. **Волновой фронт** перпендикулярен лучу (рис. 6. 10). Волновой фронт представляет собой геометрическое место всех частиц, колеблющихся с одинаковой фазой. Лучи направлены **радиально**, а фронты представляют собой соответственно окружности и сферы.

В случае плоского или удаленного источника возникают плоские волны. В них лучи параллельны, а волновые фронты представляют собой плоскости.

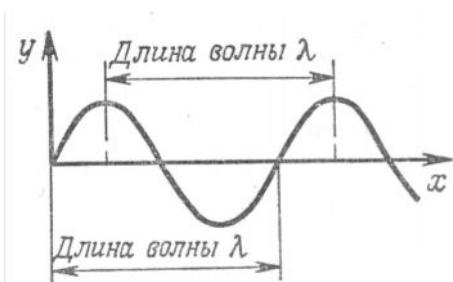


Рис. 6.11

Расстояние между соседними волновыми фронтами называется длиной волны λ .

Длина волны есть расстояние между частицами, колеблющимися с одинаковой фазой $\Delta\varphi = 2\pi$. Длинной волны не зависит ни от координаты, ни от времени (рис. 6. 11)

5. Связь длины волны с частотой колебаний источника волн:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} = \frac{2\pi v}{\omega} \quad (6. 30)$$

$$\text{или } v = \lambda f$$

где v - скорость распространения волн, $f = \frac{1}{T}$ частота колебаний в источнике, ω - циклическая частота. Частота колебаний зависит только от свойства источника волн. От свойств среды зависит скорость распространения волн и, вследствие этого, длина волны.

6. Уравнение плоской синусоидальной волны, распространяющейся вдоль оси OX:

$$S_x = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi \right] \quad (6.31)$$

Величина $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{2\pi}{\lambda}$ называется волновым числом. Она показывает, сколько длин волн укладывается на расстоянии, равной 2π единиц длины. Другая форма уравнения плоской волны имеет вид

$$S_x = A \cos(\omega t - Kx + \varphi) \quad (6.32)$$

7. Уравнение сферической волны записывается в форме.

$$S_r = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - Kr + \varphi) \quad (6.33)$$

где A_0 - амплитуда волны в точках среды, которые находятся на расстоянии единицы длины от источника волны

8. Волновое уравнение. Для любых механических волн получается следующее волновое уравнение в частных производных:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (6.34)$$

где коэффициент c характеризует свойства среды (упругость, плотность и др). Он совпадает с фазовой скоростью.

Глава 7. Электромагнитные колебания (ЭМК)

§ 7.1 Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания

1. Электрическая цепь, состоящая из катушки с индуктивностью L , конденсатора с емкостью C и резистора с сопротивлением R , называется колебательным контуром (рис. 7. 1).



Рис. 7.1

В сопротивление R входит также сопротивление обмотки катушки. Опыт показывает, что если зарядить конденсатор, а затем замкнуть цепь то в контуре возникают свободные электрические колебания. Для изучения этих колебаний соберем цепь, изображенную на рис. 7. 2.

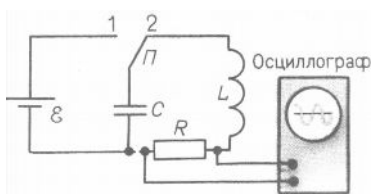


Рис. 7.2

Когда ручка переключателя повернута влево, конденсатор присоединяется к источнику и заряжается. Если ручку перебросить вправо, то конденсатор замыкается на катушку и в контуре возникают колебания, о чем можно судить по осциллограмме.

2. Рассмотрим теперь процесс превращения энергии в колебательном контуре без активного сопротивления (идеальный контур Томсона) при свободных ЭМК. Отсчет времени t мы начинаем в момент подключения к контуру заряженного конденсатора. При этом вся энергия W колебательного контура заключена в его электрическом поле, т. е.

$$W = W_{\text{э}} = \frac{1}{2} C U_m^2 \quad (7.1)$$

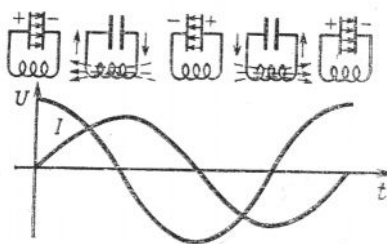
К моменту времени $t = \frac{1}{4} \cdot T$. Конденсатор полностью разряжается, напряжение U между его обкладками становится равным нулю и электрическое поле в нем отсутствует ($\vec{E} = 0$).

К этому времени ток i в контуре и индукция \vec{B} магнитного поля этого тока достигают максимальных значений. Следовательно вся энергия контура заключена в этот момент в его магнитном поле т. е.

$$W = W_M = \frac{1}{2} LI_m^2 \quad (7.2)$$

К моменту времени $t = \frac{1}{2} T$ ток в контуре прекращается, следовательно, исчезает магнитное поле ($\vec{B} = 0$). Напряженность электрического поля \vec{E} и напряжение U конденсатора максимальны. Следовательно, вся энергия колебательного контура заключена теперь в его

электрическом поле т. е. $W = W_{\mathcal{E}} = \frac{1}{2} CU_m^2$: К моменту



времени $t = \frac{3}{4} T$ конденсатор полностью разряжается, напряжение U между его обкладками падает до нуля, электрическое поле исчезает ($\vec{E} = 0$), а ток i в контуре и индукция \vec{B} магнитного поля в этот момент максимальны. Вся электрическая энергия контура превратилась в энергию магнитного поля т. е.

$W = W_M = \frac{1}{2} LI_m^2$ К моменту времени $t = T$ ток в контуре прекращается, исчезает магнитное поле, а напряженность \vec{E} электрического поля конденсатора и напряжение U на нем максимальны. Следовательно, вся энергия колебательного контура заключена теперь в его электрическом поле, т. е. $W = W_{\mathcal{E}} = \frac{1}{2} CU_m^2$. Таким образом, завершилось полное колебания.

В дальнейшем процесс повторяется в уже описанном порядке.

3. Отсюда следует, что в колебательном контуре происходит периодический процесс преобразования энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и наоборот. Это вполне аналогично процессу преобразования энергии в пружинном маятнике.

4. Максимальное значение энергии поля в конденсаторе

$$W_M^{\mathcal{E}} = \frac{q_M^2}{2C} \quad (7.3)$$

Аналогично для магнитного поля катушки

$$W_M^{\text{Магн}} = \frac{1}{2} LI_M^2 = \frac{1}{2} Lq_M^2 \omega_0^2 \quad (7.4)$$

где $I_M = \omega_0 q_M$

Приравнявая эти величины и производя соответствующие сокращения, получим выражение для собственной круговой частоты колебаний в контуре:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7.5)$$

Собственный период

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \quad (7.6)$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_{\text{Э}}} = \frac{2\pi}{\frac{1}{\sqrt{LC}}} = 2\pi\sqrt{LC}$$

§ 7. 2. Уравнение свободных электромагнитных колебаний в контуре и его решение.

1. В контуре Томсона полная энергия W остается постоянной в течение всего времени колебаний. Она равна сумме энергий $W_{\text{Э}} = \frac{q^2}{2C}$ электрического поля конденсатора и $W_M = \frac{Li^2}{2}$ магнитного поля катушки индуктивности:

$$W = W_{\text{Э}} + W_M = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} \quad (7. 6)$$

где C – емкость конденсатора; i – индуктивность катушки; q и i – мгновенные значения заряда конденсатора и тока в контуре. Найдем производную по времени от выражения (7. 6):

$W' = \left(\frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} \right)'$ т. к. полная энергия W контура является величиной постоянной, то

$$W' = 0. \text{ т. е. } \left(\frac{q^2}{2C} \right)' + \left(\frac{Li^2}{2} \right)' = 0.$$

Согласно правилам дифференцирования, получим $\frac{1}{2C} 2qq' + \frac{L}{2} 2ii' = 0$

$$\text{откуда следует, что} \quad ii' = -\frac{1}{LC} qq' \quad (7. 7)$$

Сила тока i равна первой производной от заряда по времени, т. е. $i = q'$. Следовательно, первая производная от силы тока по времени является второй производной от заряда по времени, т. е. $i = q''$. С учетом сказанного формулу (7. 7) записываем в виде $q'q'' = -\frac{1}{LC} qq'$ т. е.

$$q'' = -\frac{1}{LC} q \quad (7. 8)$$

где

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2 \text{ т. е. } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7. 9)$$

С учетом этого

$$q'' = -\omega_0^2 q \quad (7. 10)$$

Формула (7.9) является уравнением свободных электромагнитных колебаний в контуре без активного сопротивления ($R = 0$).

Сравним уравнение (7. 10) с уравнением свободных колебаний пружинного маятника.

$$x'' = -\omega_0^2 x \quad (7. 11)$$

Следовательно, свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре описываются уравнением того же типа, что и свободные гармонические колебания.

Это означает, что ω_0 в формуле (7. 10) собственной циклической частотой свободных ЭМК и что решение уравнения (7. 10) имеет вид, аналогичный решению уравнения (7. 11) $x = x_m \cos \omega_0 t$ аналогично к этому

$$q = q_m \cos \omega_0 t \quad (7.12)$$

где q_m - амплитудное значение заряда, сообщенного конденсатора.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что такое колебательный контур?
2. Нарисуйте схему опыта, в котором изучают процесс разряда конденсатора через катушку индуктивности.
3. Что называют электромагнитными колебаниями?
4. Какие электромагнитные колебания называют свободными? Почему такие колебания являются затухающими?
5. Какое сопротивление называют активным?
6. Какой контур называют контуром Томсона?
7. Что называют периодом, частотой, циклической частотой ЭМК
8. Получите уравнение свободных электромагнитных колебаний в контуре Томсона.

§ 7.3. Затухающие ЭМК

1. Всякий реальный контур обладает активным сопротивлением. Энергия в контуре, постепенно расходуется в этом сопротивлении на нагревание, вследствие чего сумма всех напряжений должна быть:

$$U_L + U_C + U_R = 0 \quad (7.11)$$

где

$$U_L = LI = L\ddot{q}, \quad U_C = \frac{q}{C}, \quad U_R = R_i = R_t^q = R\dot{q}$$

тогда

$$L\ddot{q} + \frac{q}{C} + R\dot{q} = 0 \quad (7.12)$$

После деления на получим:

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{q}{LC} = 0 \quad (7.13)$$

2. Принять во внимание, что величина, обратная LC, равна квадрату собственной частоты контура ω_0 (см. формулу (7.9)) т. е. $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и введя обозначение

$$\frac{R}{2L} = \beta \quad (7.14)$$

Уравнение (7.13) можно придать вид

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad (7.15)$$

Решение уравнения (7.15) имеет вид

$$q = q_{m0} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha) \quad (7.16)$$

где $w = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$. Подставив значение (7.9) т. е. $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и (7.14) т. е. $\frac{R}{2L} = \beta$, найдем, что

$$w_{зам} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (7.17)$$

Период затухающих ЭМК

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (7.18)$$

§ 7.4. Вынужденные ЭМК

1. Чтобы вызывать вынужденные ЭМК нужно включить последовательно к элементам колебательного контура переменную эдс или разорвать контур, подать на образовавшиеся контакты переменное напряжение (рис 7.3)

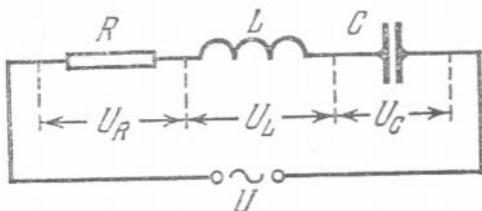


Рис. 7.3

$$U = U_m \cos \omega t \quad (7.19)$$

Вместе формулы (7.11) имеем

$$U_L + U_C + U_R = U_m \cos \omega t \quad (7.20)$$

или

$$\ddot{q} + \frac{R}{L} \dot{q} + \frac{q}{LC} = \frac{U_m}{L} \cos \omega t \quad (7.21)$$

$$\text{или } \ddot{q} + 2\beta \dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t \quad (7.22)$$

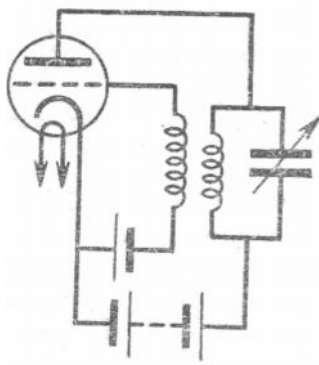


Рис. 7.4

Здесь ω_0^2 и β определяются формулами (7.9) и (7.14) уравнение (7.22) совпадает с дифференциальным уравнением вынужденных механических колебаний.

Для получения незатухающих высокочастотных колебаний часто применяют электронные лампы.

Чтобы компенсировать затухание колебаний в контуре, включенном в анодную цепь лампы, напряжение с этого контура через катушку связи подается на сетку лампы для управления

анодным током (рис. 7.4).

В основу такого метода получения незатухающих колебаний положен принцип, носящий название **обратной связи**.

2. Так же работают и транзисторные устройства, предназначенные для получения незатухающих колебаний. О транзисторе вы уже знакомы в лабораторных работах: $p-n-p$ и $n-p-n$ - типах. Транзисторы $p-n-p$ - типа применяются чаще, потому что они проще в изготовлении.

Вопросы для закрепления пройденного

1. Какие электромагнитные колебания называют затухающими?
2. Почему такие колебания являются затухающими?
3. Запишите уравнение затухающих колебаний?
4. Запишите формулу решения уравнения затухающих колебаний?
5. Запишите состав и период затухающих ЭМК?
6. Какие электромагнитные колебания называют вынужденными?
7. Укажите схему вынужденных колебаний?
8. Запишите формулу (уравнение) вынужденных колебаний?

Глава 8. Электромагнитные волны (ЭМВ)

§ 8. 1. Свойства электромагнитных волн

1. Электромагнитной волной называется распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. Электромагнитные волны подразделяются на радиоволны и световые волны.

2. Возможность существования электромагнитных волн обусловлен тем, что существует связь между переменными электрическим и магнитным полями.

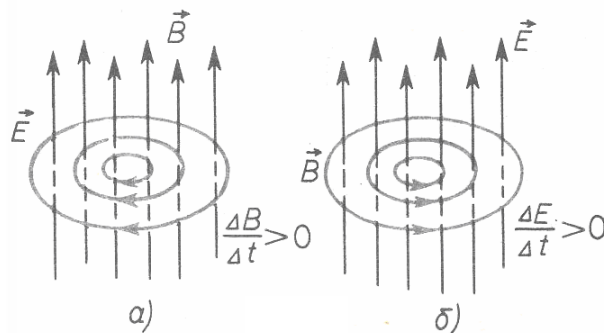


Рис. 8.1

Переменное магнитное поле создает вихревое электрическое поле. Существует и обратное явление: переменное во времени электрическое поле порождает вихревое магнитное поле (рис. 8. 1)

На рис. 8. 1, а, б показано возникновение электрического \vec{E} и магнитного \vec{B} вихревых полей соответственно при изменении магнитного и электрического полей.

3. Переменное электрическое поле в вакууме или диэлектрике характеризуется вектором **плотности тока смещения** $\vec{j}_{см}$.

$$\vec{j}_{см} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\Delta} \vec{E}}{\Delta t} \quad (8. 1)$$

где ε_0 - электрическая постоянная в СИ, ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды. Ток смещения, подобно току проводимости и вызывает появление вихревого магнитного поля.

Максвелл установил, что индукционное электрическое поле появляется в любой точке пространства, где существует переменное магнитное поле, независимо от того, имеется ли там проводящий контур. Основные отличия индукционного электрического поля от других видов электрических полей состоят в следующем.

Во – первых это поле не связано с электрическими зарядами, а неразрывно связано с переменным магнитным полем

Во – вторых, аналогично магнитному полю, данное поле является вихревым, т. е его линии напряженности представляют собой замкнутые кривые (по этому часто индукционное электрическое поле называют вихревым электрическим полем).

4. Фазовая скорость электромагнитной волны в среде определяется из формулы Максвелла

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (8. 2)$$

где ε и μ - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды,

c – скорость света в вакууме. Скорость распространения электромагнитных волн в данной среде совпадает со скоростью света в этой среде. Это совпадение не случайно и является одним из обоснований электромагнитной природы света.

5. В вакууме $\varepsilon = \mu = 1$. Поэтому c – скорость электромагнитных волн в вакууме где

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

6. Электромагнитные волны являются поперечными волнами так как \vec{E} и \vec{B} взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной к вектору \vec{v} скорости распространения волны.

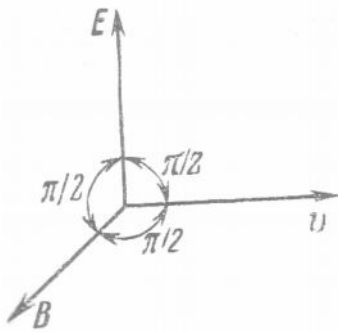


Рис. 8.2

Взаимно перпендикулярные векторы \vec{E} и \vec{B} в электромагнитной волне, распространяющейся в свободном пространстве, колеблются в одинаковой фазе – они одновременно обращаются в нуль и одновременно достигают максимальных значений (рис. 8. 2)

7. Электромагнитная волна называется монохроматической (от греческих слов «monos» - один, единственный и «chromatos» - цвет).

Такая волна называется линейно поляризованной (плоско поляризованной) (рис. 8. 3)

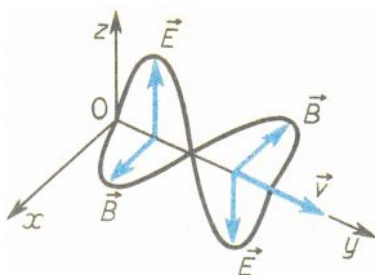


Рис. 8.3

§ 8. 2. Энергия электромагнитных волн. Вектор Умова – Пойнтинга

1. Электромагнитные волны переносят энергию. Плотность энергии электромагнитного поля

W складывается из плотности энергии электрического поля $W_E = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$ и плотности энергии магнитного поля $W_H = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$ т. е

$$W = W_E + W_H = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} \quad (8. 4)$$

2. В непроводящей среде векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются в одинаковой фазе. По этому амплитуды этих векторов связаны соотношением

$$E_m \sqrt{\epsilon_0 \epsilon} = H_m \sqrt{\mu_0 \mu} \quad (8. 5)$$

и значениями E и H справедливо для их мгновенных значений.

Отсюда следует, что плотности энергии электрического и магнитного полей волны каждый момент времени одинаковы: $W_E = W_H$. Поэтому можно написать, что

$$W = 2W_E = \epsilon_0 \epsilon E^2 \quad (8. 6)$$

Воспользовавшись тем, что $E \sqrt{\epsilon_0 \epsilon} = H \sqrt{\mu_0 \mu}$ выражению (8. 6) можно придать вид

$$W = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu} E H = \frac{1}{v} E H \quad (8. 7)$$

Умножив выражение (8. 7) на скорость волны v , получим модуль вектора плотности потока энергии

$$s = w \cdot v = E H \quad (8. 8)$$

формула (8. 8) векторной форме

$$\vec{S} = [\vec{E} \cdot \vec{H}] \quad (8.9)$$

Вектор \vec{S} называется вектором Умова – Пойнтинга.

Умов (1846 - 1915) русский физик в 1884 Ввел понятия о потоке электромагнитной энергии.

Пойнтинг (1852 - 1914) – английский физик Ввел в 1821 понятие о потоке электромагнитной энергии.

Направления вектора $[\vec{E}\vec{H}]$ совпадает с направлением переноса энергии.

§ 8. 3. Излучение и прием ЭМВ, их свойства

1. ЭМВ, теоретически предсказанные Максвеллом, были экспериментально получены в 1888г Немецким физиком Герцен (1857 - 1894). Для получения волн Герц применил изобретенный им вибратор, которое является открытым колебательным контуром. Его отличие от закрытого колебательного контура (в котором электрическое поле сосредоточено между пластинами конденсатора) состоит в том, что в нем способен излучать ЭМВ в окружающее пространство.

2. Схема излучения и приема ЭМВ в опытах Герца изображена на (рис. 8. 4). Вибратор Герца

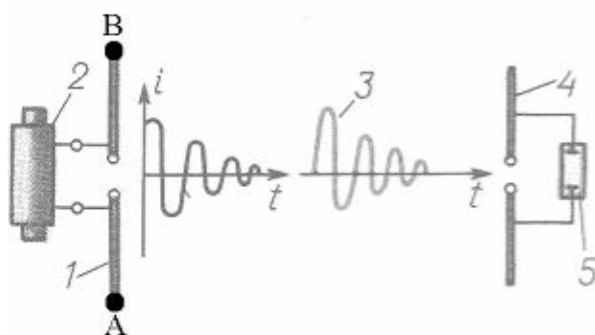


Рис. 8.4

1 состоит из двух проводников одинаковой длины, разделенных небольшим воздушным зазором, который называют искровым промежутком. Проводники заряжают до высокой разности потенциалов, подключая к ним индукционную катушку Румкорфа 2, которая представляет собой импульсный трансформатор. Когда напряжение между проводниками вибратора достигает значения, при котором происходит пробой воздушного промежутка, в этом промежутке проскакивает искра, замыкающая цепь, и в открытом контуре происходят свободные ЭМК (показаны на (рис 8. 4)) в виде зависимости $\frac{i}{t}$. Частота этих колебаний велика, так как емкость и индуктивность вибратора Герца малы.

3. ЭМК, возбуждаемые в вибраторе Герца, быстро затухают: во первых, потому что велико активное сопротивление открытого контура (особенно в искровом промежутке) и, во – вторых, потому что излучая ЭМВ, вибратор отдает свою энергию. Индукционная катушка вновь повышает напряжение между проводниками вибратора до возникновения пробоя воздушного промежутка, и весь процесс повторяется сначала. Таким образом, ЭМВ излучаются вибратором Герца в виде серии затухающих импульсов малой длительности 3.

4 Вибратор Герца, линейные размеры l которого малы по сравнению с длиной волны, которую он излучает ($l \leq \lambda$), называется **диполем Герца**. Излучение диполя Герца подобно излучению диполя, рассмотренного раньше, с той разницей, что переменный электрический момент P_e диполя создается колебаниями заряда $q(P_e = ql)$ разноименно заряженных шаров A и B (рис. 8. 4) по гармоническими законами: $P_e = P_0 \cos \omega t$ а не периодическими изменениями расстояния между ними. К диполя Герца подводится ток $I = I_0 \sin \omega t$ который считается одинаковым в данный момент во всей цепи. Излучение диполя не одинаково в различных направлениях. Вдоль своей оси диполь не излучает ЭМВ (см. рис. 8. 4)

5. Прием ЭМВ в опытах Герца производился с помощью приемного вибратора 4 точно такого же, как и излучающий вибратор. К приемному вибратору подключалась маленькая разрядная трубка 5. ЭМВ, дошедшая до приемного вибратора, возбуждала в нем ЭМК.

Между электродами разрядной трубки возникало напряжение и происходил газовый разряд, сопровождающийся слабым свечением газа, которое свидетельствовало о приеме электромагнитной волны вибратором. Мощность электромагнитного излучения, создаваемого вибратором Герца, невелика.

6. Русский ученый Попов (1859 - 1906) установил, что интенсивность излучения можно значительно увеличить, если подключить к колебательному контуру антенну и заземление (рис. 8. 5).

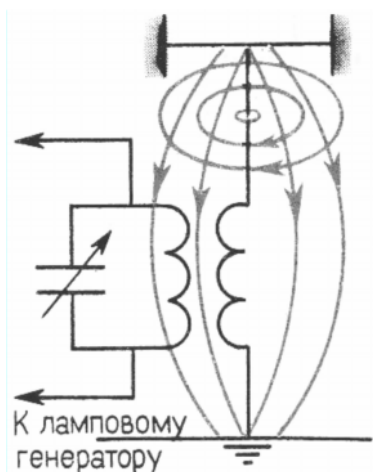


Рис. 8.5

Антенна представляет собой провод, натянутой над поверхностью Земли между двумя высокими мачтами и закрепленный на изоляторах. Горизонтальный провод антенны подключается к колебательному контуру передатчика с помощью вертикального провода (иногда называемого **снижением**). Колебательный контур, подключенный к антенне является открытым. Он индуктивно связан с колебательным контуром лампового генератора (рис. 8. 5).

В опытах Герца длина ЭМВ была приблизительно равна $\lambda = 0,66\text{ м}$. Зная частоту излучения вибратора Герца, можно по формуле $v = \lambda\omega$ определить скорость ЭМВ. Расчет показывает, что она равна $\approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

§ 8. 4. Шкала Эмв

1. В зависимости от частоты ν (или длины волны в вакууме $\lambda = \frac{c}{\nu}$, где c скорость ЭМВ в вакууме) а также способа. Излучения и регистрации различают несколько видов ЭМВ: радиоволны, оптическое излучение, рентгеновское излучение и гамма – лучи.

2. Радиоволнами называются ЭМВ, длина λ которых в вакууме больше $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (соответственно $\nu < 6 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$). В связи с особенностями распространения и генерации весь диапазон радиоволн принято делить на 9 под диапазон (см. таблицу)

Таблица 1

название поддиапазона	Длина волн, м	частота, Гц
Сверхдлинные волны	более 104	менее $3 \cdot 10^4$
Длинные волны	$10^4 - 10^3$	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$
Средние волны	$10^3 - 10^2$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$
Короткие волны	$10^2 - 10$	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$
Метровые волны	$10 - 1$	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$
Дециметровые волны	$1 - 0,1$	$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$
Сантиметровые волны	$0,1 - 0,01$	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$
Миллиметровые волны	$10^{-2} - 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$
Субмиллиметровые волны	$10^{-3} - 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$

3. Оптическим излучением, или светом, называются ЭМВ (электромагнитное излучение), длина которых в вакууме лежат в диапазоне от 10 нм до 1мм (границы условны).

К оптическому излучению относятся инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения). Инфракрасным излучением (ИК) называется ЭМ излучение, испускаемое

нагретыми телами, длина волн которого в вакууме лежат в пределах от 1мм до 770 НМ ($1\text{нм}=10^{-9}\text{м}$).

Видимым излучением, или видимым светом, называется ЭМ излучение с длинами волн в вакууме от 770 до 380НМ, которое способно непосредственно вызывать зрительное ощущение в человеческом глазе.

Ультрафиолетовым излучением (УФ) называется электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме от 380 до 10 Нм.

4. Рентгеновским излучением, или рентгеновскими лучами, называется ЭМ излучение, которое возникает при взаимодействии заряженных частиц и фотонов с атомами вещества и характеризуется длинами волн в вакууме, лежащими в широком диапазоне с условными границами от 10 – 100НМ до 0,01 – 1ПМ ($1\text{пм}=10^{-12}\text{м}$). Гамма – излучением или гамма – лучами, называется электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме менее 0,1Нм, которое испускается возбужденными атомами ядрами при распаде частиц и других процессах.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что называют электромагнитной волной?
2. Проиллюстрируйте рисунками и опишите процесс передачи электромагнитных воздействий?
3. Какой формулой выражается плотности тока смещения?
4. Какова характерная особенность электромагнитных волн?
5. Какой формулой выражается зависимости скорости распространения ЭМВ в среде в вакууме?
6. Какова формула объемная плотность энергии ЭМП волны?
7. Какая формула выражает связь амплитуды векторов \vec{E} и \vec{H} ?
8. Покажите вектора Умова – Пройтинга через модуля вектора плотности потока энергии?
9. Сделав пояснительный рисунок, опишите процесс излучения и приема ЭМВ в опытах Герца . Как устроен вибратор Герца, каков принцип его действия?
10. Как осуществлялся прием ЭМВ в опытах Герца?
11. Какой способ предложил Попов для увеличения интенсивности электромагнитного излучения? Начертите схему и объясните принцип действия открытого колебательного контура с антенной и заземлением.
12. По каким свойствам и способам, особенностям диапазон радиоволн принято делить на 9 под диапазонов? Покажите это в виде таблицы.

Элементы радиотехники

§ 8. 5. Радиосвязь

1. Радиосвязь. В 1895г. А.С. Попов (1859-1906) доложил Русскому физика - химическому обществу об открытии им грозоотметчика – прибора, позволяющего регистрировать ЭВМ, возникающие при грозовых разрядах, это был первый радиоприемник.

Через год Попов на заседании того же общества продемонстрировал сеанс радиосвязи: Из одного здания в другое, находящееся на расстоянии 250м, была передана радиограмма: «Генрих Герц».

2. В настоящее время, когда радио – и телевизионная связь осуществляется между Землей и Космическими Кораблями, находящимися вблизи Венеры или Марса сообщение о передаче на расстояние в 250м или даже нескольких километров может показаться мелочью.

3. Но не надо забывать, что это были первые шаги человечества в новой, низведенной области науки и техники.

На заре радиотехники для получения высокочастотных колебаний использовали высокочастотный искровой разряд. Это позволило осуществлять только радиотелеграфную связь, передача звука исключалась, так как затухающие импульсы нельзя модулировать.

4. Полный переворот в радиотехнике совершила электронная лампа – триод и его модификации – многосеточные электронные лампы. С их помощью удалось создать схемы для генерации незатухающих ЭМВ.

5. Начиная с пятидесятых годов радиолампы во многих схемах заменяются полупроводниковыми приборами – транзисторами, которые обладают рядом важных достоинств.

§ 8. 6. Радиовещание

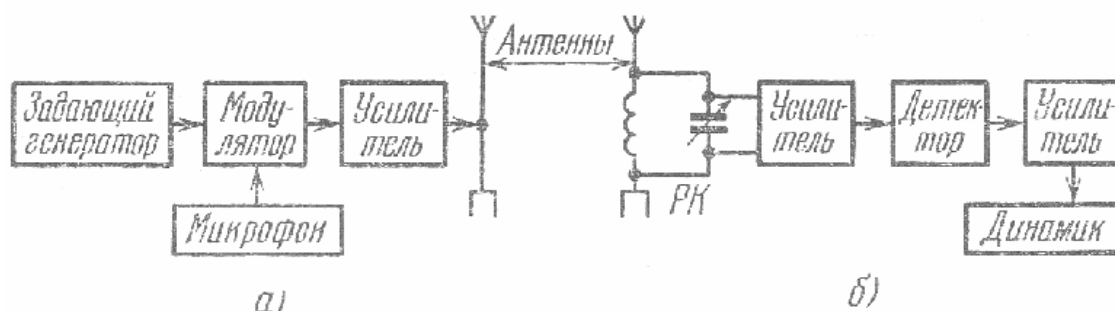


Рис. 8.6

1. Основой современного радиопередатчика (рис. 8.6 а)

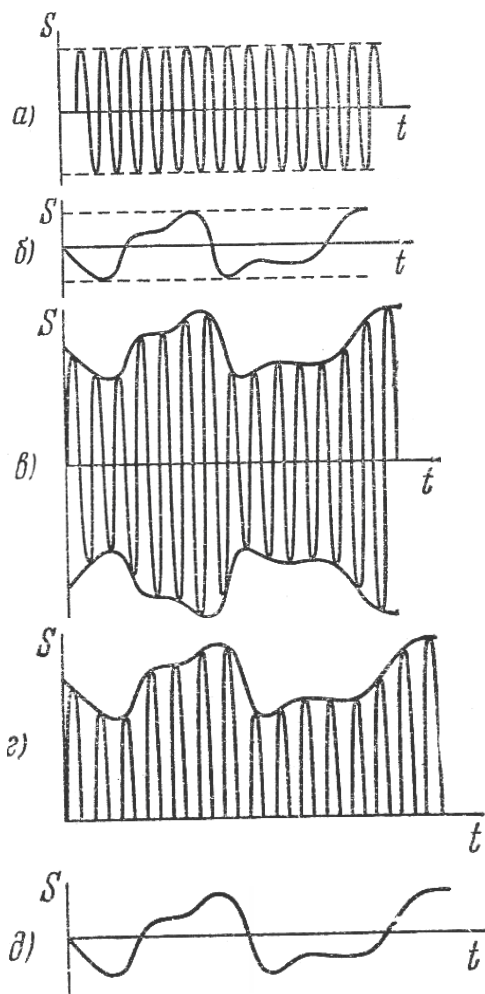


Рис. 8.7

является генератор незатухающих колебаний, собранный на лампах или на транзисторах. Генератор вырабатывает колебания высокой частоты (несущая частота ω), которые изображены (на рис.8. 7, а).

Звуковые колебания (рис.8. 7, б) поступают в микрофон и здесь преобразовываются в электрические колебания. В модуляторе происходит процесс преобразования незатухающих синусоидальных колебаний в модулированные колебания (рис.8. 7, в). Модуляцией ЭМВ называется изменение ее параметров (амплитуды, частоты, начальной фазы). После усиления, амплитудно модулированные колебания поступают в антенну, которая служит для излучения ЭМВ.

2. Эти волны поступают в антенну приемника и вызывают колебания в резонирующем контуре РК (рис.8. 6, б). Слабые колебания высокой частоты поступают в усилитель, затем – в детектор (демодулятор). Процесс выделения низкочастотной составляющей называется демодуляцией. Демодуляция осуществляется с помощью детектора – проводника с односторонней проводимостью. Им может служить, например, двухэлектродная электронная лампа, кристаллический диод. Из детектированных колебаний (рис.8. 7г) выделяется низкочастотная (звуковая) составляющая (рис.8. 7,

д), которая вновь усиливается и передается на динамик.

3. Резонирующий контур РК приемника состоит из катушки и конденсатора переменной емкости, что позволяет настраивать контур на частоту волны, которую излучает та или иная радиостанция. Чем выше несущая частота, тем более широкий интервал частот может быть воспроизведен без искажений. Это одна из причин, почему сейчас все более широко используется диапазон коротких и ультракоротких волн.

§ 8. 7. Телевидение

1. Схема телевидения в основном совпадает со схемой радиовещания (рис. 8. 6, а и б). В передатчике колебания несущей частоты модулируются не только звуковым сигналом, но и предварительно усиленными сигналами изображения, поступающими от передающих трубок (икonosкопов или суперортиконов). В объеме модуляции входят также сигналы для синхронизации развертки электронного пучка в электроннолучевой трубке – иконоскопов или суперортиконов, (рис. 8. 8). В объем модуляции входят также сигналы для синхронизации развертки электронного пучка в электроннолучевой трубке – иконоскопе, на экране которого возникает изображение. В телевизионном приемнике высокочастотный сигнал разделяется на три: сигнал изображения, звуковое сопровождение и сигнал управления.

2. После усиления эти сигналы поступают в свои тракты и используются по назначению. Сигналы управления синхронизируют работу генераторов, осуществляющих развертку электронного луча по горизонтали (см. рис. 8. 8) вдоль строк – и перебрасывание его с одной строки на другую. Всего за $\frac{1}{25}$ секунды электронный пучок записывает 625 строк, составляющих один кадр. Если при этом отсутствует видеосигнал, то экран освещен равномерно. Усиленный сигнал изображения подается на управляющий электрод электронной пушки. При этом меняется интенсивность электронного пучка и, в связи с этим, яркость данной точки экрана, где возникает изображение.

3. Телевизионный сигнал несет большой объем информации и занимает полосу частот порядка 4 – 5 МГц (в радиовещательном приемнике – около 10 кГц).

В качестве несущих частот ЭМВ используются высокие частоты – от 50 МГц до 900 МГц (что соответствует длинам волн от 6м до 30см) (сравни с таблицей №1).

4. Радиолокацией называется обнаружение и определение местонахождения различных объектов с помощью радиоволн.

Радиолокация основана на явлении отражения и расстояния радиоволн телами.

Радиолокатор (радар) представляет собой комбинацию ультракоротковолнового (табл. №1) радиопередатчика и радиоприемника имеющих общую приемное – передающую антенну, которая создает остронаправленное излучение (радиолуч). Излучение осуществляется короткими импульсами с продолжительностью приблизительно $10^{-6}c$. В промежутки времени между двумя последовательными импульсами излучения антенна автоматически переключается на прием сигнала, отраженного от цели.

Расстояние до цели, ее местонахождение определяется по промежутку времени Δt между отправлением сигнала и приемом отраженного сигнала.

5. Радиоастрономией называется раздел физики и астрономии, в котором космические объекты излучаются по их собственному ультракоротковолновому радиоизлучению (главным образом в области сантиметровых и дециметровых волн (см. табл. №1) которые слабо поглощаются на пути от объектов до Земли).

Для приема и излучения радиоизлучения космических объектов применяются специальные **радиотелескопы**, чувствительность которых, благодаря большим эффективным площадям антенн, значительно превосходит чувствительность самых крупных современных оптических телескопов. Радиоастрономические методы позволяют исследовать физические свойства поверхностных слоев планет солнечной системы и их температуры.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Перечислите основные даты и события, связанные с изобретением радио.
2. Перечислите основные области применения радио. С чем связан переворот в радиотехнике.
3. Что называют модуляцией? Какие виды модуляции существуют?
4. Начертите схему и опишите устройство и действие генератора незатухающих амплитудное – модулированных колебаний.
5. Изобразите графически сущность процесса амплитудной модуляции.
6. Что называют детектированием? Начертите схему детекторного приемника и опишите его устройство и действие.
7. Графически изобразите сущность процесса детектирования.
8. Что называется электроннолучевой трубкой?
9. Начертите схему устройства электроннолучевой трубки?
10. Расскажите назначение катод, сетки и анодов называемые электронной пушкой.
11. Для чего служат управляющие пластины?
12. Что такое информация, сообщения, сигнал?
13. Что называется радиоастрономией?

Решение типовых задач

12. 2. Написать уравнение гармонического колебательного движения с амплитудой $A = 0,1 м$, периодом $T = 4 с$ и начальной фазой $\varphi = 0$.

Решение:

Уравнение гармонического колебания имеет вид: $x = A \sin(\omega t + \varphi)$. Круговая частота $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Подставляя числовые данные, получим $x = 0,1 \sin \frac{\pi}{2} t$.

12. 16. Уравнение колебаний материальной точки массой $m = 10 г$ имеет вид $x = 5 \sin\left(\frac{\pi}{5} t + \frac{\pi}{4}\right) см$. Найти максимальную силу F_{\max} , действующую на точку, и полную энергию W колеблющейся точки.

Решение:

Т. к. уравнение колебаний имеет вид $x = 5 \sin\left(\frac{\pi}{5} t + \frac{\pi}{4}\right) - (1)$, то ускорение при колебательном

движении $a = \frac{d^2 x}{dt^2} = 5 \frac{\pi^2}{25} \sin\left(\frac{\pi}{5} t + \frac{\pi}{4}\right)$. Тогда максимальная сила, действующая на точку (см.

задачу 12. 15), $F_{\max} = m \frac{\pi^2}{5} 197 мкН$. Кинетическая энергия материальной точки равна

$W_k = \frac{mv_x^2}{2} = \frac{kA^2 \omega^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)}{2}$. Потенциал энергия материальной точки равна

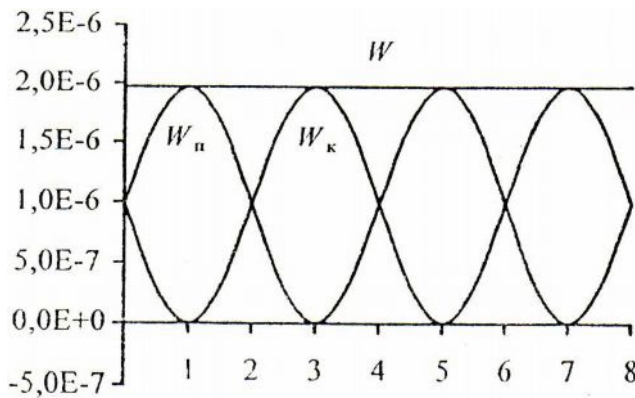
$W_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0)}{2}$, а т. к. $k = m\omega^2$, то $W_n = \frac{m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0)}{2}$. При этом за

нулевой уровень отсчета потенциальной энергии выбирает положение равновесия ($x = 0$).

Полная энергия колеблющейся точки $W_0 = W_k + W_n = \frac{m\omega^2 A^2}{2}$ или, с учетом $\omega = \frac{2\pi}{T}$, имеем

$W = \frac{2\pi^2 m}{T^2} A^2$ - (2). Из уравнения (1) амплитуда $A = 5$ см и период $T = 10$ с, подставляя их в уравнение (2), получаем $W = 4,93$ мкДж.

12. 17. Уравнение колебаний материальной точки массой $m = 16$ г имеет вид $x = 2 \sin\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{4}\right)$ см. Построит график зависимости от времени t (в пределах одного периода) кинетической W_k , потенциальной W_n и полной W энергии точки.



Решение:

Уравнения для кинетической и потенциальной энергии колеблющейся точки имеют следующий вид:

$$W_k = \frac{\omega^2 m}{2} \times A^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad \text{и}$$

$$W_n = \frac{\omega^2 m}{2} A^2 \sin^2(\omega t + \varphi). \quad \text{Полная энергия}$$

$$\text{колеблющейся точки } W = \frac{\omega^2 m}{2} A^2 \quad (\text{см.}$$

задачу 12. 16).

По условию $A = 2$ см, $\omega = \frac{\pi}{4}$, $\varphi = \frac{\pi}{4}$. Подставляя числовые данные, получим

$$W_k = 2\pi^2 \cdot 10^{-7} \cos^2\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ Дж}; \quad W_n = 2\pi^2 \cdot 10^{-7} \sin^2\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ Дж}; \quad W = 2\pi^2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}.$$

12. 20. Полная энергия тела, совершающего гармоническое колебательное движение, $W = 30$ мкДж; максимальная сила, действующая на тело, $F_{\max} = 1,5$ мН. Написать уравнение движения этого тела, если период колебаний $T = 2$ с и начальная фаза $\varphi = \frac{\pi}{3}$.

Решение:

Полная энергия тела, совершающего гармоническое колебательное движение, $W = \frac{2\pi^2 m}{T^2} A^2$

- (1), а максимальная сила, действующая на тело, $F_{\max} = \frac{4\pi^2 m}{T^2} A$ - (2). Разделив (1) на (2),

получим $\frac{W}{F_{\max}} = \frac{A}{2}$, отсюда амплитуда колебаний $A = \frac{2W}{F_{\max}} = 0,04$ м. Подставляя амплитуду

колебаний, период колебаний и начальную фазу в общее уравнение гармонических колебаний $x = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right)$, окончательно получаем $x = 0,04 \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$.

12. 23. К пружине подвешен груз массой $m = 10$ кг. Зная, что пружина под влиянием силы $F = 9,8$ Н растягивается на $l = 1,5$ см, найти период T вертикальных колебаний груза.

Решение:

По закону Гука сила упругости $F = -kx$ (знак «минус» говорит о том, что F - возвращающая сила), откуда $k = \frac{|F|}{x}$ - (1) - коэффициент жесткости пружины. Уравнение второго закона Ньютона для груза имеет вид $m\ddot{x} = -kx$ - (2). Введя обозначение $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, преобразуем уравнение (2) следующим образом: $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$. Величина $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ - циклическая частота колебаний, отсюда период колебаний вертикального пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ - (3). Подставляя (1) в (3), окончательно получим $T = 2\pi\sqrt{\frac{ml}{F}} = 0,78 \text{ с}$.

12. 30. Написать уравнение движения, получающегося в результате сложения двух одинаково направленных гармонических колебательных движений с одинаковым периодом $T = 8 \text{ с}$ и одинаковой амплитудой $A = 0,02 \text{ м}$. Разность фаз между этими колебаниями $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{4}$. Начальная фаза одного из этих колебаний равна нулю.

Решение:

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинакового периода получается гармоническое колебание того же периода с амплитудой $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$ и с начальной фазой, определяемой уравнением $\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$, где A_1 и A_2 - амплитуды слагаемых колебаний, φ_1 и φ_2 - их начальные фазы. Подставляя числовые данные получим

$A = \sqrt{2 \cdot (0,02)^2 + 2(0,02)^2 \cos \frac{\pi}{4}} = 0,037 \text{ м}$; $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sin(\pi/4)}{1 + \cos(\pi/4)} = \frac{\pi}{8}$; $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{4}$. Отсюда уравнение результирующего движения $x = 0,037 \cos\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{8}\right)$.

14. 1. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 888 \text{ пФ}$ и катушки с индуктивностью $L = 2 \text{ мГн}$. На какую длину волны λ настроен контур?

Решение:

По формуле Томсона период электромагнитных колебаний в контуре $T = 2\pi\sqrt{LC}$ - (1). Длина волны, на которую настроен контур, $\lambda = cT$ - (2). Подставляя (1) и (2), получаем $\lambda = 2\pi c\sqrt{LC} = 2512 \text{ м}$.

14. 2. На какой диапазон длин волн можно настроить колебательный контур, если его индуктивность $L = 2 \text{ мГн}$, а емкость может меняться от $C_1 = 69 \text{ нФ}$ до $C_2 = 533 \text{ нФ}$?

Решение:

Длина волны, на которую можно настроить контур (см. задачу 14. 1), $\lambda = 2\pi c\sqrt{LC}$ - (1). Подставляя в (1) значения емкостей C_1 и C_2 , получаем диапазон длин волн от $\lambda_1 = 700 \text{ м}$ до $\lambda_2 = 1946 \text{ м}$.

14. 4. Катушка с индуктивностью $L=30\text{мкГн}$ присоединена к плоскому конденсатору с площадью пластин $S=0,01\text{ м}^2$ и расстоянием между ними $d=0,1\text{ мм}$. Найти диэлектрическую проницаемость ε среды, заполняющей пространство между пластинами, если контур настроен на длину волн $\lambda=750\text{ м}$.

Решение:

Емкость плоского конденсатора $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ - (1), где ε - диэлектрическая проницаемость среды, S - площадь пластин конденсатора, d - расстояние между ними. Длина волны, на которую настроен контур (см. задачу 14. 1), $\lambda = 2\pi c\sqrt{LC}$ - (2). Подставляя (1) в (2),

получаем $\lambda = 2\pi c\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 SL}{d}}$ - (3). Возведя уравнение (3) в квадрат, получим

$\lambda^2 = \frac{4\pi^2 c^2 \varepsilon\varepsilon_0 SL}{d}$, откуда диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей

пространство между пластинами конденсатора, $\varepsilon = \frac{\lambda^2 d}{4\pi^2 c^2 \varepsilon_0 SL} = 5,96$.

14. 8. Уравнение изменения со временем тока в колебательном контуре имеет вид $I = -0,02 \sin 400\pi t$ А. Индуктивность контура $L=1\text{ Гн}$. Найти период T колебаний, емкость C контура, максимальную энергию W_m магнитного поля и максимальную энергию $W_{эл}$ электрического поля.

Решение:

По условию уравнение изменения тока со временем $I = -0,02 \sin 400\pi t$ - (1). Закон изменения со временем тока в цепи (см. задачу 14. 7) $I = -CU_0\omega \sin \omega t$ - (2). Сопоставляя (1) и (2), находим период колебаний $T = 5\text{ мс}$. С другой стороны, по формуле Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$ -

(3), откуда после возведения (3) в квадрат емкость конденсатора $C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} = 0,63\text{ мкФ}$. Ток

максимален, когда $\sin 400\pi t = -1$, т. е. $I_{\max} = 0,02\text{ А}$. Тогда максимальная энергия

магнитного поля $W_m = \frac{LI^2}{2} = 0,2\text{ мДж}$. Поскольку колебания в контуре не затухают, то по

закону сохранения энергии максимальная энергия электрического поля $W_{эл} = W_m = 0,2\text{ мДж}$.

14. 12. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C=405\text{ нФ}$, катушки с индуктивностью $L=10\text{ мГн}$ и сопротивления $R=2\text{ Ом}$. Во сколько раз уменьшится разность потенциалов на обкладках конденсатора за один период колебаний?

Решение:

Разность потенциалов на обкладках конденсатора меняется со временем по закону

$U = U_0 e^{\delta t} \cos \omega t$, следовательно, за время $t=T$ отношение $\frac{U_0}{U} = e^{\delta T}$ - (1), где

$T = \frac{2\pi}{\sqrt{1/LC - (R/2L)^2}}$ - (2) - период электромагнитных колебаний в контуре, $\delta = \frac{R}{2L}$ - (3) -

коэффициент затухания. Подставляя (2) и (3) в(1), окончательно получаем

$$\frac{U_0}{U} = \exp\left(\frac{\pi R}{\sqrt{L/C - R^2/4}}\right) = 1,02.$$

Глава 9. Интерференция света

§ 9.1. Световая волна

1. Свет представляет собой сложное явление: в одних случаях он ведет себя как электромагнитная волна, в других - как поток особых частиц (фотонов).

В данном семестре излагается волновая оптика, т. е. круг явлений, в основе которых лежит волновая природа света. Совокупность явлений, обусловленных корпускулярной (корпускула – частица) природой света, будет рассмотрена в третьем семестре.

2. Для измерения длины волны у световых волн (красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый) и волн близкого к оптическому диапазона (инфракрасных, ультрафиолетовых, рентгеновских) применяются следующие единицы измерения:

1 мкм (микрометр) = 10^{-6} м;

1 нм (нанометр) = 10^{-9} м;

1 Å (ангстрем) = 10^{-10} м.

3. Видимый свет - это электромагнитные волны, лежащие в диапазоне длин волн от

$\lambda_k = 7900 \text{ Å} = 780 \text{ нм} = 0,78 \text{ мкм}$ (красный свет)

$\lambda_\phi = 4000 \text{ Å} = 400 \text{ нм} = 0,4 \text{ мкм}$ (фиолетовый свет).

4. В электромагнитном волне колеблются векторы \vec{E} и \vec{H} . Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями электрического \vec{E} .

Вместе с тем не следует забывать, что оба вектора поля (\vec{E} и \vec{H}) неразрывно связаны в электромагнитной волне и ни при каких условиях нельзя получить волну, в которой была бы только одна составляющая поля.

5. Световая волна, у которой направления колебаний электрического (и соответственно магнитного)

вектора хаотически меняются, так что для него равновероятны все направления колебаний в плоскости, перпендикулярной лучу, называются естественным светом. (рис. 9. 1)

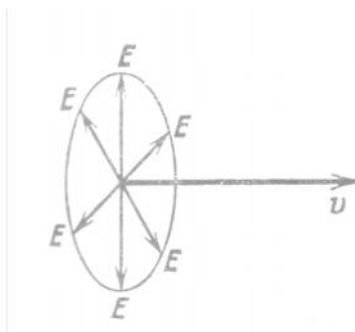


Рис. 9.1

§ 9.2 Интерференция света

1. Интерференцией называется усиление и ослабление в результате сложения двух (или нескольких) световых волн с одинаковыми периодами и с постоянной разностью фаз и колебания происходят в одной плоскости. Для интерференции света необходимо, чтобы световые волны были когерентны. Если разность фаз возбуждаемых волнами колебаний остается постоянной во времени, то волны называются когерентными. В случае некогерентных волн разность фаз непрерывно изменяется и интерференция не наблюдается.

2. Для получения когерентных волн с помощью обычных (не лазерных) источников применяют метод разделения света от одного источника на две или несколько систем волн. В каждом из них представлено излучение одних и тех же атомов источника, так что в силу общности происхождения эти системы волн когерентны между собой и интерферируют при наложении. Интерференционная картина возникает только при сложении когерентных световых волн. Волны одинаковой частоты, у которых разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ независим от времени т. е. $\varphi_2 - \varphi_1 = \delta = const$ (чаще всего $\delta = 0$) называются когерентными. Свет, которому соответствует одна определенная частота (одна определенная длина волны) называется монохроматическим (один цвет).

3. Имеется много способы наблюдения интерференции света (зеркала Френеля, Бипризма Френеля, интерференция в тонких пленках, Кольцами Ньютона) методом расщепление волны, испускаемой одним источником света на две или несколько волн. После прохождения

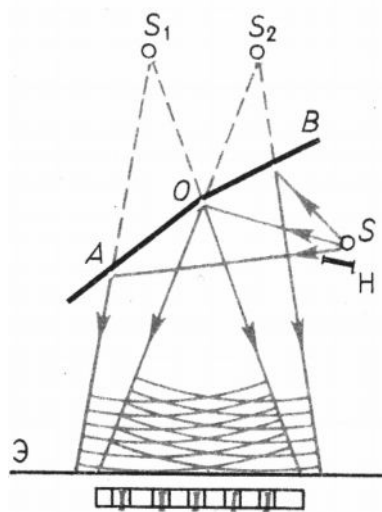


Рис. 9.1

непрозрачным экранам Н. Световой пучок, идущий от источника S, делится зеркалами на два когерентных пучка, которые перекрываются между собой и попадают на экран Э, где фиксируется интерференционная картина.

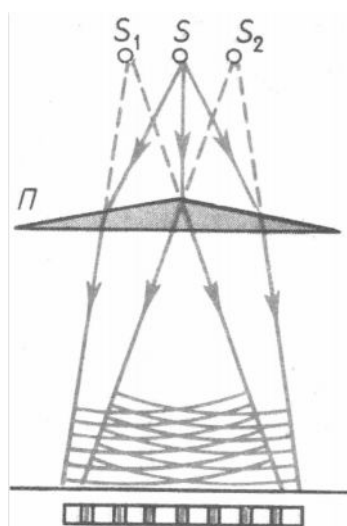


Рис. 9.2

различных оптических длин путей ($\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1 = m\lambda$) - условия усиления;

$\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1 = (2m - 1)\frac{\lambda}{2}$ - условие ослабления волн), эти

волны накладываются в точках наблюдения так как они когерентны, дают интерференционную картину.

где n_1 и n_2 - показатели преломления среды, r_1 и r_2 - длины пути. $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

4. Мы рассмотрим некоторые способы расщепления светового пучка на две части

а) метод двойного зеркала Френеля заключается в следующем (рис. 9.1)

Перед зеркалами АО и ОВ, расположенными относительно друг друга под углом, близким к 180° , помещают источник света S, отгороженный от экрана Э небольшим

непрозрачным экранам Н. Световой пучок, идущий от источника S, делится зеркалами на два когерентных пучка, которые перекрываются между собой и попадают на экран Э, где фиксируется интерференционная картина. Результат получается таким же, как если бы происходило наложение волн от двух когерентных источников S_1 и S_2 . В действительности же точки S_1 и S_2 не являются источниками света, а представляют собой мнимые изображения в зеркалах источника света S.

б) Метод бипризмы Френеля (рис. 9.2)

состоит в следующем. Свет от источника S направляют на две тонкие стеклянные призмы, склеенные своими основаниями. Призмы расщепляют световой пучок, идущий от источника, на два когерентных пучка, которые взаимно перекрываются и попадают на экран Э, где в результате их наложения образуется интерференционная картина, такая же, какая появилась бы, если бы волны шли от двух когерентных источников, находящихся в точках S_1 и S_2 .

5. Если в последнем эксперименте используют **монохроматический свет** (т. е. свет одного какого-либо цвета), то интерференционная картина на экране имеет вид чередующихся темных и светлых полос, причем светлые полосы имеют тот же цвет, что и используемый свет. Если же используют белый цвет, то интерференционная картина имеет радужную

окраску. В каждой светлой полосе наблюдают плавно переходящие друг в друга семь основных цветов (от красного до фиолетового).

6. Интерференция света в тонких пленках.

В некоторых случаях интерференцию света можно наблюдать естественных условиях. Например, если белый свет отражается от тонкой пленки нефти или керосина, находящейся на поверхности воды или асфальта, эта пленка окрашивается в радужный цвет.

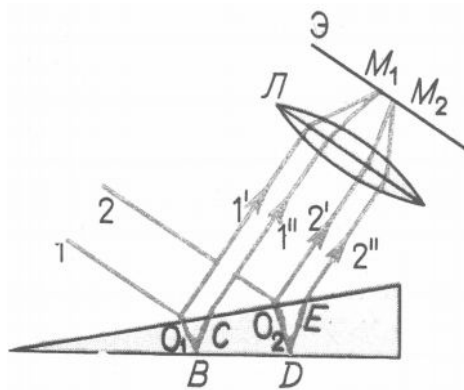


Рис. 9.3

Аналогичную картину можно получить, если осветить белым светом тонкую мыльную пленку (например, мыльные пузыри). Эти явления объясняются интерференцией света, возникающей в результате отражения света от передней и задней поверхностей тонкой пленки.

На рис. 9.3 изображена тонкая пленка клиновидной формы освещаемая параллельным световым пучком. Волна 1 падающая на пленку в точке O, разделяется на две волны 1' и 1''. Первая из них отражается от верхней поверхности, а вторая проходит внутрь пленки и отражается от ее задней поверхности в точке

В. Дойдя до точки С и преломившись, волна 1''

выходит из пленки и идет параллельно волне 1'. Между этими волнами существует разность хода, образовавшаяся в результате того, что волна 1'' проходит путь больший, чем волна 1', на длину участка пути $|O, BC|$.

При этом надо учитывать и тот факт, что волны идут в разных средах: волна 1' идет только в воздухе, а волна 1'' часть своего пути проходит в веществе пленки. В данном случае для расчета интерференционной картины, которая получается на экране Э, где указанные волны накладываются друг на друга с помощью собирающей линзы Л, необходимо знать не геометрическую разность хода волны Δr , а оптическую разность хода Δl .

$$\Delta l = n_2 r_2 - n_1 r_1 \quad (9.1)$$

где r_2 и r_1 - расстояния, проходимые волнами в разных средах, а n_2 и n_1 - абсолютные показатели преломления этих сред (из данной формулы следует, что если обе волны распространяются в одной и той же среде, т. е. $n_1 = n_2 = n$, то оптическая разность хода

$\Delta l = n \Delta r$, т. е. равна произведению геометрической разности хода волн на абсолютный показатель преломления среды. В вакууме $n = 1$ и оптическая разность хода волн совпадает с их геометрической разностью хода). Допустим, что оптическая разность хода волн 1' и 1'' такова, что в точке их наложения М, образуется интерференционный максимум. Очевидно, что для каких-то соседних волн 2' и 2'', образовавшихся при разделении в пленке волны 2,

оптическая разность хода окажется на $\frac{\lambda}{2}$ больше, чем для волн 1' и 1'', так как пленка имеет

разную толщину. Тогда в точке наложения M_2 волн 2' и 2'' образуется интерференционный минимум. Следовательно, на экране Э должна наблюдаться картина чередования темных и светлых полос, причем если падающий на тонкую пленку свет является белым, то светлые полосы имеют радужную окраску. Цветовая окраска интерференционных полос легко объяснима. Белый свет состоит из семи различных цветов.

7. Кольца Ньютона. Еще в 1675г Ньютон наблюдал интерференцию (Кольца Ньютона). Интерференцию свете можно наблюдать с помощью плосковыпуклой стеклянной линзы

малой кривизны, опирающейся своей выпуклой частью на плоскую стеклянную пластинку (рис. 9.4).

Как видно из этого рисунка, между выпуклой частью линзы и стеклянной пластинкой находится тонкий слой воздуха переменной толщины. Если сверху на линзу направить

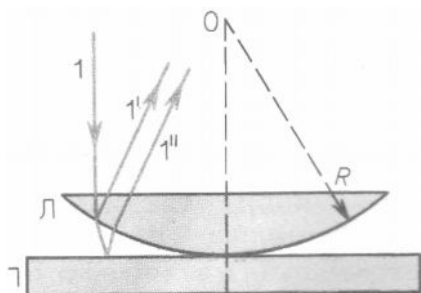


Рис. 9.4

световой пучок, то в отраженном свете наблюдается такая картина: в центре, там где линза касается стеклянной пластинки, образуется темное пятно, а вокруг него возникают чередующиеся светлые и темные кольца разного диаметра (если свет белый, то светлые кольца имеют цветную окраску). Расстояния между соседними кольцами уменьшаются с увеличением их радиуса. Впервые данное явление наблюдал Ньютон, поэтому описываемая интерференционная картина впоследствии получила название Колец Ньютона.

Сам Ньютон не смог объяснить причину возникновения колец в 1801г обеднение этому было дано Юнгом Томас (1773-1829) англ. ученый. Один из создателей волновой оптики с ранних лет обнаружил необыкновенные способности и феноменальную память. В 2 года научился бегло читать, в 4 года знал на память много сочинений английский поэтов, 8-9 лет овладел токарным ремеслом и мастерил различные физические приборы, к 14 годом познакомился с дифференциальным исчислением (по Ньютону), изучил много языков (греческий, латынь, французский, итальянский, арабский и др). Учился в 3х университетах медицину, физики-оптики акустику 1801 профессор. Подвергал критике корпускулярную теорию Ньютона в 1801г. Первый объяснил явление интерференции волн, объяснил Кольца Ньютона и т. д.

Интерференционная картина имеет вид светлых и темных колец, радиусы светлых колец Ньютона (в происходящем свете) определяются формулами:

$$\left. \begin{aligned} r_m &= \sqrt{mR\lambda} \quad , \quad \text{где } m = 1, 2 \\ r_m &= \sqrt{(2m-1)R \cdot \frac{\lambda}{2}} \quad , \quad m = 1, 2 \end{aligned} \right\} \quad 9.2$$

где R-радиус кривизны линзы, r_m - радиус окружности. Значению $m = 1$, соответствует $r_m = 0$, т. е. точка вместе касания пластинки и линзы. В этой точке наблюдается минимум интенсивности, обусловленный изменением фазы на π при отражении световой волны от пластинки. Перпендикулярно падающие на линзы световые волны, например волна 1, разделяются на две части. Волна 1' образуется при отражении света от выпуклой поверхности линзы на границе раздела между светлом и воздухом, а волна 1'' образуется при отражении света от стеклянной пластины на границе раздела между воздухом и стеклом. Обе эти волны когерентны. Они имеют оптическую разность хода, возникающую вследствие того, что волна 1'' проходит больший путь, чем волна 1'.

В зависимости от значения этой оптической разности хода при наложении волн происходит усиление или ослабление колебаний. Измерив радиусы колец Ньютона и зная радиус кривизны поверхности линзы можно определить длины световой волны.

§ 9.3 Использование интерференции света

1. Явление интерференции световых волн имеет большое практическое применение. Его широко используют для создания различных измерительных и контролирующих устройств. Особо точные измерения производят с помощью приборов называемых **интерферометрами**. С помощью интерферометров контролируют также качество обработки поверхностей зеркал, точность изготовления деталей оптических инструментов и измерительных приборов. С

высокой точностью определять толщину тонких плоскопараллельных пластинок и проверять качество полировки поверхностей.

Интерференционные рефрактометры используют для измерений показателя преломления различных веществ и для обнаружения изменений показателя преломления и т.д.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Кем была развита волновая теория света?
 2. Кем и когда была создана электромагнитная теория света?
 3. Кем и когда была создана квантовая теория света? В чем заключается ее сущность?
 4. В чем сущность корпускулярно- волнового дуализма материи?
 5. Каковы современные представления о природе света?
 6. Что называют интерференцией света? При каких условиях ее наблюдают?
 7. Нарисуйте схемы и опишите способы наблюдения интерференции света с помощью зеркал и бипризмы Френеля?
 8. Сделав пояснительный рисунок, опишите и объясните интерференцию света в тонких пленках.
 9. Что называют оптической разностью хода? Какая формула выражает сущность этого понятия. По какой формуле вычисляют оптическую разность хода волн, идущих в одной среде?
 10. Опишите опыт по наблюдению Колец Ньютона. Как объясняют это явления?
 11. Приведите примеры практического применения интерференции света?
- Интерферометры.

10. Дифракция света

§ 10. 1. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля

1. Характерным проявлением волновые свойств света является также дифракция света, т. е. Отклонения света прямолинейного распространения при встрече с отверстием, щелью или краем преграды, размеры которых сравнимы с длиной световой волны.

2. Для решения дифракционных явлений применяются приближенные методы основанные на принципах Гюйгенса и Гюйгенса-Френеля.

а) Принцип Гюйгенса (1629-1695)- голландский физик, астроном: Каждая точка $S_1, S_2 \dots S_n$, фронта волны АВ является источником новых вторичных волн. Новое

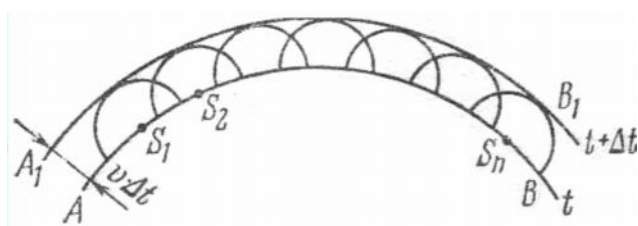


Рис. 10.1

положение фронта волны A_1B_1 через времени Δt представляет собой огибающую поверхность вторичных волн (рис. 10.1).

Принцип Гюйгенса является чисто геометрическим. Он позволяет, например, объяснить равенство углов падения α и отражения α' на поверхности MN среды

при отражении света.

б) Принцип Гюйгенса-Френеля.

Френель (1788-1827) – французский физик дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн. Учет амплитуд и фаз вторичных волн позволяет найти амплитуду результирующей волны в любой точке пространства. Таким образом принцип Гюйгенса получил название принципа Гюйгенса-Френеля.

§ 10. 2. Зоны Френеля

1. Чтобы понять суть метода, разработанного Френелем, определим амплитуду светового колебания, возбуждаемого в точке М сферической волной, распространяющейся в изотропной однородной среде из точечного источника S (рис. 10.2)

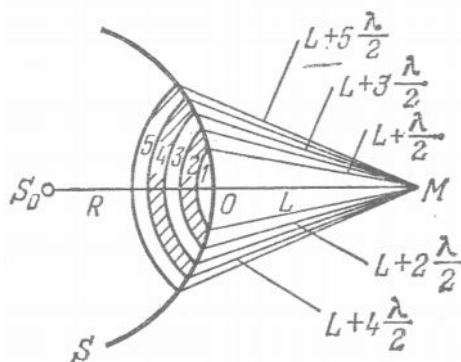


Рис. 10.2

Волновые поверхности такой волны симметричны относительно прямой SM. Разобьем изображенную на рисунке волновую поверхность на кольцевые зоны, построенные так, чтобы расстояния от краев каждой зоны до точки М отличались на $\lambda/2$ (λ - длина волны в той среде, в которой распространяется волна). Обладающие таким свойством зоны носят название **зон Френеля**. Из рис. 10. 2 видно, что расстояние L_m от внешнего края m -ой зоны до точки М равно

$$L_m = L + m \frac{\lambda}{2} \quad (10. 1)$$

где L- расстояние от вершины волновой поверхности O до точки М.

2. Колебания, приходящие в точку М от аналогичных точек двух соседних зон находятся в противофазе. Поэтому и результирующие колебания, создаваемые каждой из зон в целом, будут для соседних зон отличаться по фазе на π .

Площади зон Френеля примерно одинаковы и равны

$$S_n = \frac{\pi R L \lambda}{R + L} \quad (10. 2)$$

Радиус первой зоны Френеля определяется по формуле

$$r_n = \sqrt{\frac{R L n \lambda}{R + L}} \quad (10. 3)$$

Радиус первой зоны Френеля определяется по формуле

$$r_1 = \sqrt{\frac{R L \lambda}{R + L}} \quad (10. 4)$$

3. Амплитуда А результирующего колебания в точке М равна

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \quad (10. 5)$$

В это выражение все амплитуды от нечетных зон входят с одним знаком, а от четных зон – с другим. Запишем выражение (10. 5) в виде

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots \quad (10. 6)$$

Тогда выражения в скобках будут равны нулю, и формула (10. 6) упрощается следующим образом:

$$A = \frac{A_1}{2} \quad (10. 7)$$

Согласно формуле (10. 7) амплитуда, создаваемая в точке М всей сферической волновой поверхностью, равна половине амплитуды, создаваемой одной лишь центральной зоной.

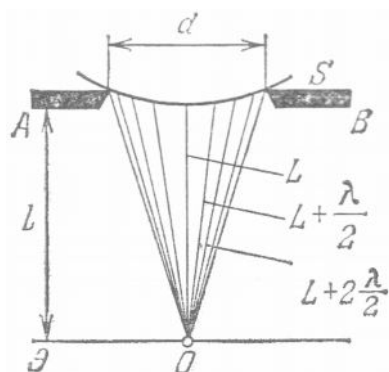
4. Если на пути поставить непрозрачный для света экран с отверстием, оставляющим открытой только центральную зону Френеля, амплитуда в точке М будет равна A_1 , т. е. в два раза превзойдет амплитуду (10. 7). Соответственно интенсивность света в точке М будет в этой случае в четыре раза больше, чем при отсутствии преград между точками S и М.

5. Значительно большее усиление света в точке М можно осуществить с помощью зонной пластинки – стеклянной пластинки, на поверхность которой нанесено непрозрачное

покрытие в виде колец, закрывающих только четные либо только нечетные зоны Френеля. Зонная пластинка действует на свет подобно собирающей линзе.

§ 10.3. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске

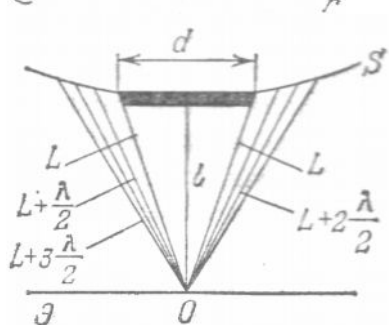
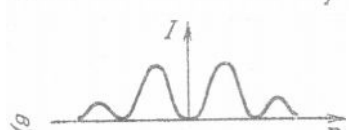
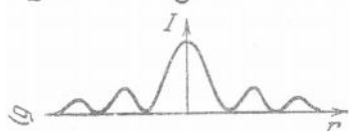
1. Дифракция Френеля на круглом отверстии в непрозрачном экране АВ (рис. 10.3).



а) При освещении отверстия монохроматическим светом с длиной волны λ на экране Э параллельном АВ наблюдается система чередующихся темных и светлых интерференционных колец с общим центром в точке О лежащем напротив центра отверстия.

б) Если число зон нечетное укладывается на отверстии $(2k + 1)$, то в точке О находится светлое пятно.

в) Если в отверстии укладывается четное число $2k$ ($k = 1, 2, \dots$) зон Френеля, то в точке О находится темное пятно – амплитуда света в этой точке меньше чем в отсутствие экрана.



2. Дифракция Френеля на непрозрачном диске

(непрозрачным для света кругом экране) (рис. 10.4)

разобьем волновой поверхности S падающей монохроматической сферической волны на зоны (рис. 10.4). Интерференционная картина на экране Э имеет вид концентрических темных и светлых колец с центром в точке О, где всегда находится интерференционный максимум

(пятно Пуассона) $A = \frac{A_1}{2}$. Ход интенсивности света I с расстоянием r от точки О изображен на рис. 10.4, б.

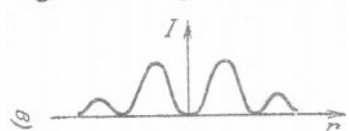


Рис. 10.4

§ 10.4. Дифракция света на щели. Дифракционная решетка

1. Пусть на непрозрачный экран Е, в котором прорезана узкая щель ВС, имеющая постоянную ширину $b = BC$ и длину $L \gg b$, падает перпендикулярно к экрану пучок параллельных лучей монохроматического света (рис. 10.5).

На экране Э, удаленном от щели на расстояние L , будет наблюдаться явление дифракции. Экран установлен в фокальной плоскости собирающей линзы МЛ

2. Усиление света (дифракционные максимумы) наблюдается под углом φ , удовлетворяющими условию

$$b \cdot \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (10.8)$$

Условие ослабления света (дифракционные минимумы):

$$b \cdot \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (10.9)$$

Число m называется порядком дифракционного максимума или минимума. Величина $\delta = CD = b \sin \varphi$ представляет собой оптическую разность хода между крайними лучами

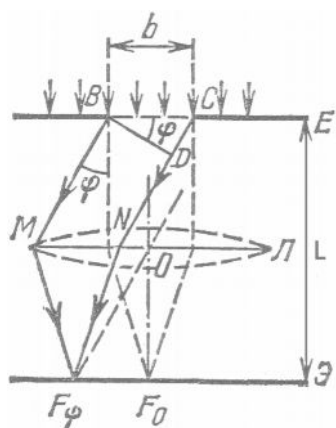


Рис. 10.5

CN и BM, идущими от щели под углом φ (рис. 10. 5). В направлении $\varphi = 0$ наблюдается самый интенсивный центральный максимум нулевого порядка. В точке F_0 всегда наблюдается усиление света, независимо от значения λ .

2. При наблюдении дифракции на щели в белом свете интерференционная картина на экране оказывается окрашенной.

3. Дифракционной решеткой называется совокупность большого числа препятствий и отверстий, сосредоточенных в ограниченном пространстве, на которых происходит дифракция света (рис. 10. 6)

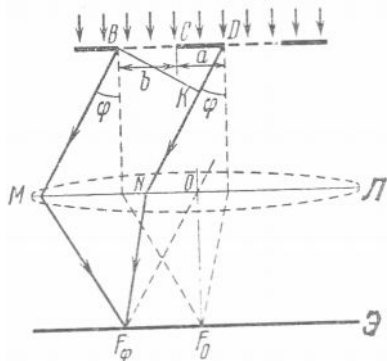


Рис. 10.6

Величина $d = b + a$ называется постоянной (периодом) дифракционной решетки. Если на дифракционную решетку перпендикулярно падает пучок параллельных лучей света то под углом дифракции φ на экране Э, расположенном в фокальной плоскости линзы, будет наблюдаться система дифракционных максимумов удовлетворяющими условию $d \sin \varphi = n\lambda$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) - называется порядком главного максимума.

где $d \sin \varphi = DK = \delta$ является оптической разностью хода между лучами BM и DN, идущими от соседних щелей (рис. 10. 6). Главный минимум на дифракционной решетке

наблюдается условием, которого является $b \sin \varphi = m\lambda$ ($m = 1, 2, 3, \dots$).

§ 10.5. Дифракция на пространственной решетке

Закон Вульфа – Брэгга

1. Пространственной или трехмерной дифракционной решеткой называется оптически неоднородная среда, неоднородности которой периодически повторяются при изменении всех трех пространственных координат примером пространственной дифракционной решетки может служить кристаллическая решетка твердого тела. Частицы, находящиеся в узлах этой решетки (атомы, молекулы или ионы), играют роль упорядоченно расположенных центров, когерентно рассеивающих падающий на них свет. Постоянные кристаллических решеток твердых тел значительно меньше длин волн видимого света, ($d_i \sim 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, а длина волны $\lambda_{\text{вид.св.}} \sim 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$).

Поэтому для видимого света кристаллы являются оптически однородной средой. В то же время для рентгеновских лучей ($\lambda_{\text{рентг.}} \sim \text{от } 10 \text{ нм до } 10^{-12} \text{ м}$).

Кристаллы представляют естественные дифракционные решетки.

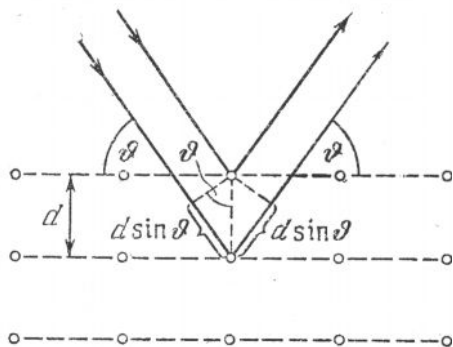


Рис. 10. 6

2. Дифракцию рентгеновских лучей на кристаллах можно объяснить как результат интерференции рентгеновского излучения, зеркально отражающегося от систем параллельных плоскостей, которые проходят через узлы кристаллической решетки. Эти плоскости называется сетчатыми, или атомными плоскостями кристалла. Расстояние d между двумя соседними сетчатыми плоскостями называется межплоскостным расстоянием, а угол φ между падающим лучом и сетчатой плоскостью углом скольжения. Русский ученый Вульф (1863-1925) и английский физик Брэгга (1862-1942) показали независимо друг от друга, что

расчет дифракции можно осуществить следующим способом. Провести через узлы кристаллической решетки параллельные равноотстоящие плоскости (рис. 10. 7), которые будут называть атомными слоями. Плоские вторичные отразившиеся от разных атомных слоев, когерентны и будут интерферировать между собой подобно дифракционной решетки. Дифракционные максимумы, определяются условием $2d \sin \varphi = \pm m\lambda$ ($m = 1, 2, \dots$). Это соотношение называется формулой Брэгга – Вульфа.

где m - порядок диф. макс. Дифракция рентгеновских лучей от кристаллов находит два основных применения: рентгеновская спектроскопия и рентгеноструктурный анализ.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что называют дифракцией света? При каких условиях ее наблюдает? Какие виды дифракции существуют? В чем состоит их отличие друг от друга?
2. Какими свойствами обладают зоны Френеля?
3. По какой формуле определяется площадь каждой зоны Френеля?
4. По какой формуле определяется радиус первой зоны Френеля? Радиус первой зоны Френеля?
5. Как записывается амплитуда результирующего колебания в точке Р с учетом фазы колебаний?
6. Чему равен амплитуда, создаваемая в точке Р всей сферической волны?
7. Как можно осуществить с помощью зонной пластинки усиление в точке Р?
8. Сделав пояснительный рисунок, опишите дифракцию Френеля на круглом отверстии?
9. Сделав пояснительный рисунок, опишите дифракцию Френеля на круглом диске?
10. Что называют дифракционной решеткой? Сделав пояснительный рисунок, опишите дифракцию света на дифракционной решетке. Что называют постоянной решетки? Что является оптической разностью хода?
11. Какие формулы выражают условие образования дифракционных максимумов и минимумов?

Глава 11. Поляризация света

§ 11. 1. Естественный и поляризованный свет

1. Явления интерференции и дифракции света свидетельствуют, что свет представляет собой волновой процесс. Однако ответа на вопрос, к каким именно волнам – поперечным или продольным – относятся световые волны, эти явления не дают, так как интерференция и дифракция свойственны и поперечным, и продольным волнам.

2. Световые пучки, излучаемые источником света, представляют собой совокупность огромного числа волн, одновременно испускаемых отдельными атомами (или молекулами) светящегося тела. Поскольку атомы излучают свет независимо друг от друга, колебания электрической напряженности \vec{E} в таких волнах происходят по всем направлениям в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (рис.11. 1). Такой свет называют естественным или неполяризованным.

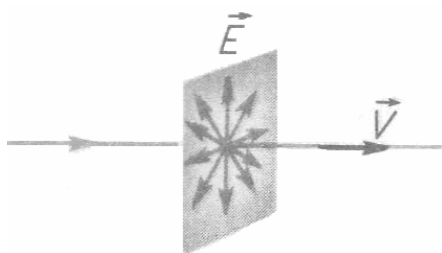


Рис. 11.1

3. Если же по какой – либо причине колебания вектора \vec{E} в световой волне становятся упорядоченными и происходят в определенных направлениях, такой свет называется поляризованным. Если таких направлений несколько, свет называют частично поляризованным (рис.11. 2)

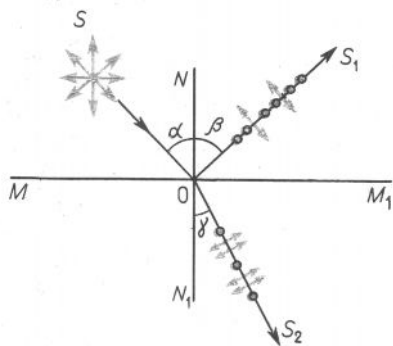


Рис. 11.2

- При распространении ЭВМ в однородной изотропной среде плоскости, в которых совершаются колебания векторов \vec{E} и \vec{B} , сохраняют свою ориентацию в пространстве. Такая волна является плоско поляризованной (рис.11. 3)

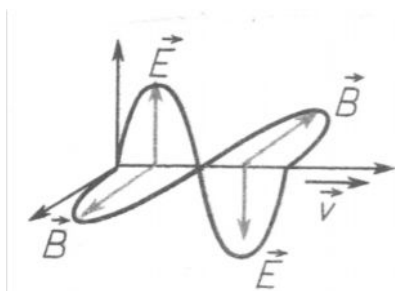


Рис. 11.3

Плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} , принято называть **плоскостью поляризации** световой волны.

4. Наблюдения показывают, что причины поляризации света могут быть различными, но наиболее часто поляризация происходит в **трех случаях**:

- при прохождении света через некоторые кристаллы (например, турмалин) обладающий способностью пропускать световые волны с колебаниями вектора \vec{E} (и соответственно \vec{B}) лежащими в одной определенной плоскости;
- при отражении и преломлении света на границе раздела двух диэлектриков;
- при двойном лучепреломлении света.

5. Рассмотрим сначала первый из этих случаев (рис.11. 4)

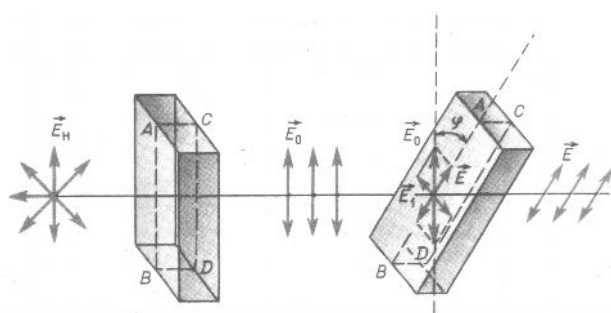


Рис. 114

Свет, идущий от источника поочередно проходит через две пластинки турмалина. Эти кристаллы, как указаны выше обладают способностью пропускать световые колебания только в одной плоскости (плоскости АВДС пропускания, показаны на рис.11. 4. штрихом). Опыт показывает, что поворот второй пластинки относительно первой вокруг горизонтальной оси приводит к изменению интенсивности света, проходящего через вторую пластинку.

Когда плоскости пропускания обеих турмалиновых пластинок оказываются перпендикулярными друг другу, свет за второй пластинкой исчезнет, так как эта пластинка не пропускает колебания, совершающиеся в плоскости, перпендикулярной ее собственной плоскости пропускания.

6. Данный опыт обнаруживает поперечность световых волн. Именно поэтому открытие явления поляризации света послужило не только доказательством поперечности световых волн, но и убедительным обоснованием справедливости электромагнитных представлений о природе света.

§ 11. 2 Закон Малюса

Закон Малюса (1775-1812)- французский физик в 1808 открыл поляризации света. Вновь вернемся к эксперименту по прохождению света через кристаллы турмалина (см. рис. 11. 4). Неполяризованный (естественный) свет от источника света, проходя через первую пластинку турмалина становится плоско поляризованным поэтому (данную пластинку называют **поляризатором**). Если плоскость пропускания анализатора ориентирована в пространстве так же, как и плоскость пропускания поляризатора, свет без препятственно проходит через анализатор. Если повернуть анализатор вокруг горизонтальной оси на 90° относительно поляризатора, свет через анализатор не проходит.

Исчезновение света является признаком того, что плоскость поляризации световой волны перпендикулярна плоскости пропускания анализатора. Установлено, что при повороте анализатора относительно поляризатора на угол φ интенсивность света I , прошедшего через обе турмалиновые пластинки, можно определить по формуле

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad (11. 1)$$

где I_0 - интенсивность света падающего на анализатор. Формулу (11.1) называют **законом Малюса**.

§ 11. 3 Поляризация света при отражении и преломлении

Закон Брюстера (1781 – 1868) – шотландский физик, в 1815 установлен закон

1. Если угол падения света на границу раздела двух диэлектриков (например, на поверхность стеклянной пластинки) отличен от нуля, отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными (см. рис.11. 2).

В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения (на рис. 11. 2 эти колебания обозначены точками), в параллельном луче – колебания, параллельные плоскости падения (на рисунке они изображены двусторонними стрелками). Степень поляризации зависит от угла падения.

2. Брюстер установил, что существует такой угол падения света α_B (названный впоследствии **углом Брюстера**), что если свет падает на границу раздела двух диэлектриков именно под этим углом, то отраженный, свет становится полностью поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (рис. 11.5). Поэтому угол Брюстера называют углом полной поляризации света. Установлено, что α_B вместе с соответствующим ему углом преломления γ составляет в сумме 90° т.е.

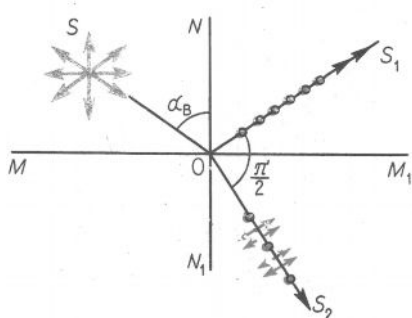


Рис. 11.5

впоследствии **углом Брюстера**), что если свет падает на границу раздела двух диэлектриков именно под этим углом, то отраженный, свет становится полностью поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (рис. 11.5). Поэтому угол Брюстера называют углом полной поляризации света. Установлено, что α_B вместе с соответствующим ему углом преломления γ составляет в сумме 90° т.е.

$$\alpha_B + \gamma = \frac{\pi}{2} \quad (11. 2)$$

Используя определение относительного показателя преломления n_{21} и соотношение (11. 2) получим

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin \gamma} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B \right)} = \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \operatorname{tg} \alpha_B \quad \text{т. е}$$

$$n_{21} = \operatorname{tg} \alpha_B \quad (11. 3)$$

Для стекла угол Брюстера $\alpha_B = 57^\circ$. Формула (11. 3) называют Законом Брюстера. Легко убедиться в том, что при падения света под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

§ 11. 4 Поляризация при двойном лучепреломлении

1. При прохождении света через все прозрачные кристаллы, за исключением принадлежащих к кубической системе наблюдается явление, получившее название **двойного лучепреломления**. Это явление заключается в том, что упавший на кристалл луч разделяется внутри кристалла на два луча, распространяющиеся, с разными скоростями и в различных направлениях. Кристаллы, обладающие двойным лучепреломлением подразделяются на **одноосные и двуосные**. У одноосных кристаллов один из преломленных лучей подчиняется обычному закону преломленных лучей подчиняется обычному закону преломления, он лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к преломляющей поверхности. Этот луч называется **обыкновенным** и обозначает буквой *o*. Для другого луча, называемого **не обыкновенным** (его обозначают буквой *e*), отношение синусов угла падения и угла преломления не остается постоянным при изменении угла падения.

2. Даже при нормальном падении света на кристалл необыкновенный луч, отклоняется от нормали (рис.11. 6).

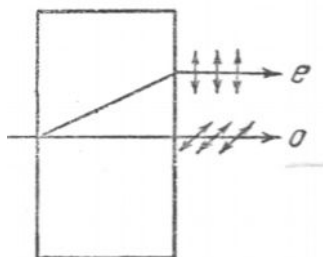


Рис. 11.5

Кроме того, необыкновенным луч не лежит, как правило, в одной плоскости с падающим лучом и нормалью с преломляющей поверхности.

3. Примерами одноосных кристаллов могут служить исландский шпат, или кальцита ($CaCo_3$) кварц и турмалин. У двуосных кристаллов (слюда, гипс) оба луча необыкновенные – показатели преломления для них зависят от направления в кристалле. В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением только одноосных кристаллов.

4. Исследование обыкновенного и необыкновенного лучей показывает, что оба луча полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях (см. рис.11. 6).

Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна к главному сечению кристалла. По выходе из кристалла оба луча отличаются друг от друга только направлением поляризации, так что названия «обыкновенный» и «необыкновенный» луч имеют смысл только внутри кристалла.

5. Явление поляризации света имеет практическое применение. Приведем несколько примеров: в машиностроении и строительной индустрии применяют для исследования напряжений, возникающих в узлах машин и строительных конструкций; в фотографии поляризационные светофильтры используют для гашения бликов, возникающих при зеркальном отражении света от фотографируемых объектов; с помощью поляризации можно плавно регулировать интенсивность светового излучения. Для этого перед источником света ставят поляризатор и анализатор, относительным поворотом которых достигают необходимого эффекта; явление поляризации света применяют также в декоративных целях, при оформлении витрин, устройстве театральные декораций и. т. д.

Вопросы для закрепление пройденного

1. Какой свет называют естественным или неполяризованным?
2. В чем состоит сущность явления поляризации волн? Каким волнам оно свойственно?
3. Перечислите основные случаи поляризации свет?
4. Каким свойством обладают кристаллы турмалина? Нарисуйте схему опыта и опишите процесс прохождения света через две турмалиновые пластинки. О чем свидетельствует данный опыт?
5. Какой свет называют неполяризованным? Частично поляризованным? Полностью поляризованным?
6. В чем суть закона Малюса? Как его записывают?
7. Сделав пояснительные рисунки, опишите процесс поляризации света на границе раздела двух диэлектриков.
8. Что называют углом полной поляризации света? Как записывают закон Брюстера?
9. Сделав пояснительный рисунок, опишите процесс поляризации света при двойном лучепреломления, когда его наблюдают и как объясняют?
10. Приведите примеры одноосных кристаллов. Что показывает исследование обыкновенного и необыкновенного лучей?
11. Приведите примеры практического использования поляризации света.

Глава 12. Поглощение, рассеяние и дисперсия света

§. 12. 1. Взаимодействие света с веществом

1. Согласно классической электронной теории, электромагнитное поле световой волны, распространяющейся в диэлектрической среде, вызывает вынужденные колебания внешних, наиболее слабо связанных электронов атомов и молекул называемых **оптическими электронами**. Электроны и ионы, совершая вынужденные колебания под действием света излучают вторичные световые волны той же частоты. Если среда однородно и изотропна, то в результате интерференции образуется проходящая волна, фазовая скорость которой зависит от частоты, а направление распространения совпадает с направлением распространения первичной волны.
2. Наконец, при падении света на границу раздела двух различных сред в результате интерференции возникает не только проходящая, но также и отраженная волна. Таким образом, в образовании отраженной волны участвует более или менее значительный слой частиц среды, прилегающий к отражающей поверхности.

§. 12. 2. Поглощение света

1. Поглощением света называется явление уменьшения энергии световой волны при ее распространении в веществе происходящее вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения имеющего другой спектральный состав и иные направления распространения (фотолюминесценция). Поглощение света может вызывать нагревание вещества, возбуждение и ионизацию атомов или молекул, фотохимические реакции и другие процессы в веществе.
2. Поглощения света описывается законом Бугера – Ламберта (законом Бугера), согласно которому интенсивность I плоской волны монохроматического света уменьшается по мере прохождения через поглощающую среду по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (12. 1)$$

Где I_0 и I значения интенсивности света на входе и выходе из слоя среды толщиной l , α - показатель поглощения среды (линейный коэффициент поглощения), который зависит от химической природы и состояния поглощающей среды и от длины волны света λ .

§. 12. 3. Рассеяние света

1. Рассеяние света называется явление преобразования света веществом, сопровождающееся изменением направления распространения света и проявляющееся как несобственное свечение вещества. Это свечение обусловлено вынужденными колебаниями электронов в атомах рассеивающей среды под действием падающего света. Рассеяние света происходит в оптически неоднородной среде, показатель преломления которой нерегулярно изменяется от точки к точке вследствие изменение плотности среды либо за счет присутствию в среде инородных малых частиц. В первом случае рассеяние света называется молекулярным рассеянием, а во втором – рассеянием света в мутной среде. Примерами мутных сред могут служить аэрозоли (дым, туман), Эмульсии, коллоидные растворы и другие среды.
2. При прохождении белого света через мелкодисперсную лучную среду в рассеянном свете преобладает коротковолновый (синие - голубой) свет, а в проходящем – длинноволновый (желто - красный). Этим объясняется, например, голубой цвет неба и желто – красный свет заходящего и восходящего Солнца.

§. 12. 4. Нормальная и аномальная дисперсия света

1. Дисперсией света называются явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины световой волны. Эту зависимость можно характеризовать функцией

$$n = f(\lambda_0) \quad (12. 2)$$

где λ_0 - длина световой волны в вакууме. Для всех прозрачных бесцветных веществ функция (12. 2) имеет в видимой части спектра характер, показанной (на рис 12. 1)

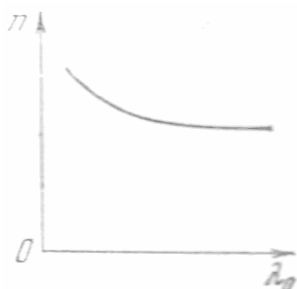


Рис. 12.1

2. Дисперсией вещества называется производная n по λ_0 т. е $dn/d\lambda_0$. С уменьшением длины волны (см. рис 12. 1) показатель преломления увеличивается, так что дисперсия вещества $dn/d\lambda_0$ отрицательна и растет по модулю с уменьшением λ_0 .

3. Дисперсия света называется нормальной в случае, если показатель преломления

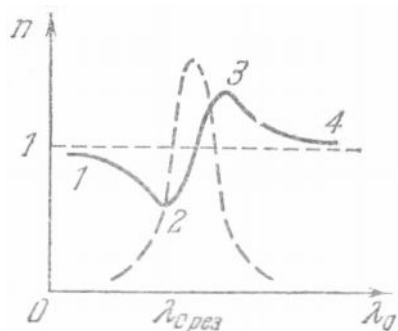


Рис. 12.2

монотонно возрастает с уменьшением длины волны λ_0 (рис. 12. 2). Участки 1 - 2 и 3 - 4 соответствуют нормальной дисперсии ($dn/d\lambda_0 < 0$). На участке 2 – 3 дисперсия аномальна ($dn/d\lambda_0 > 0$). На рис 12. 2 (дан лишь участок кривой в области одной из резонансных длин волн). Пунктирная кривая на этом рисунке изображает ход коэффициента поглощения света веществом. Поглощение света, становятся особенно интенсивными при резонансной частоте. Опыт показывает, что интенсивность света при прохождении через вещество убывает по экспоненциальному закону, (см. формулу 12. 1).

4. Среды, обладающие дисперсией, называются **диспергирующими**. В диспергирующих средах скорость световых волн зависит от длины λ_0 или частоты ω .

5. Как известно, скорость света в вакууме не зависит от частоты или длины волны и равна.

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \quad (12.3).$$

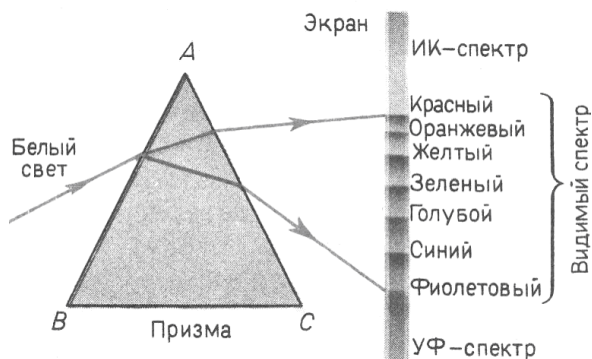


Рис. 12.3

Иную картину наблюдают при прохождении света через вещество. Так, например, дисперсия сопровождается спектральным разложением немонахроматического (белого) света через призму (рис. 12.3).

Дисперсия сопровождается спектральным разложением немонахроматического (белого) света. Причина заключается в том, что разным частотам (и, следовательно, длинам волн) соответствуют разные показатели преломления, вследствие чего

соответствующие этим частотам лучи отклоняются на разные углы от первоначального направления.

6. Абсолютный показатель преломления n среды связан со скоростью распространения света v в этой среде формулой

$$n = \frac{c}{v} \quad (12.4)$$

Следовательно, $n_{\phi} = \frac{c}{v_{\phi}}$ и $n_k = \frac{c}{v_k}$. Отсюда видно, что так как $n_{\phi} > n_k$, то $v_{\phi} < v_k$,

следовательно фиолетовый свет распространяется в веществе призмы с меньшей скоростью, чем красный.

7. Цвет определяется частотой ЭМК, а частота фиолетового больше, чем красного, значит, в одном и том же веществе скорости света для разных частот (и, следовательно, длины волн) различны.

Зависимость скорости распространения волны от ее частоты называется дисперсией. С таким же основанием можно дисперсией называть зависимость скорости волны от длины волны.

8. На экране за преломляющей призмой монохроматические цвета в спектре располагаются в следующем порядке: Красный, $\lambda_k = 7.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ и наименьший показатель преломления; оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый (имеющий наименьшую в видимом спектре длину волны $\lambda_{\phi} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ и наибольший показатель преломления).

9. В начале XIX было обнаружено, что выше (по длине волны) красной части спектре видимого света находится невидимый глазом инфракрасный участок спектра, а ниже фиолетовой части спектра видимого света находится невидимый ультрафиолетовый участок спектра. Длины волн инфракрасного излучения заключены в пределах $3 \cdot 10^{-4}$ до $7.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Наиболее характерным свойством является его тепловое излучение. На использовании инфракрасного излучения основан принцип действия приборов ночного видения.

Длины волн ультрафиолетового излучения заключены в пределах от $4 \cdot 10^{-7}$ до $6 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Наиболее характерным свойством этого излучения является его химическое и биологическое действие. Это излучение вызывает явление фотоэффекта; свечение ряда веществ (флуоресценцию и фосфоресценцию). Она убивает болезнетворных микробов, вызывает появление загара и т. д.

В науке инфракрасное и ультрафиолетовое излучения используются для исследования строения молекул и атомов вещества.

§. 12. 5. Электронная теория дисперсии

1. Дисперсия возникает только в веществе. Следовательно, дисперсия, как и другие свойства вещества, должна найти объяснение на основе структуры вещества.

Теория дисперсии на основе классической электронной теории разработал ученый Х. А. Лоренц (1853 – 1928 – нидерландский физик теоретик в 1904) создал классической электронной теории. Чтобы объяснить зависимость показателя преломления вещества от частоты (т. е. дисперсию), проанализируем механизм поляризации атома или молекулы в электромагнитном поле световой волны.

2. Пусть световой вектор совершает колебания:

$$E = E_0 \cos \omega t \quad (12. 5)$$

Под действием электрической силы $F = eE = eE_0 \cos \omega t$ электроны в атомах станут совершать вынужденные колебания. Вынужденные колебания электронного облака происходят по закону

$$l = A \cos \omega t = \frac{F_m}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t \quad (12. 6)$$

Здесь ω_0 - собственная круговая частота колебаний электронного облака, ω - круговая частота колебаний волны.

3. Наведенный полем дипольный момент молекулы совершает колебания по такому же закону:

$$P_e = el = \frac{e^2 E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t = \frac{e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cdot E \quad (12. 7)$$

Сопоставив это выражение с формулой

$$P_e = el = 4\pi r^2 \varepsilon_0 E = \alpha \varepsilon_0 E \quad (12. 8)$$

где $\alpha = 4\pi r^2$ называется поляризуемостью молекулы. Величина вектора поляризации

$$p = np_e = n\alpha \varepsilon_0 E \quad (12. 9)$$

Получим значение поляризуемости молекулы:

$$\frac{e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} E = \alpha \varepsilon_0 E \text{ отсюда } \alpha = \frac{e^2}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (12. 10)$$

Диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = n^2 \text{ согласно } \varepsilon = 1 + n_0^\alpha \quad (12. 11)$$

будет равна

$$n^2 = \varepsilon = 1 + n_0 \alpha = 1 + \frac{e^2 n_0}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (12. 12)$$

Это и есть закон дисперсии. Здесь концентрация молекул обозначена n_0 , чтобы отличить ее от показателя преломления n .

Вопросы для закрепление пройденного

1. Что называют дисперсией света? Объясните сущность этого явления и причину его возникновения.
2. Почему белый свет, проходя сквозь призму, разлагается в цветной спектр?
3. Начертите схему получения с помощью призмы спектра видимого света. Какие цвета и в какой последовательности мы наблюдаем в этом спектре?
4. В каких пределах заключены длины волн видимого света?

5. В каких пределах заключены длины волн инфракрасного и ультрафиолетового излучения? Как их используют?
6. Кем был разработана электронная теория дисперсии? Запишите формулу колебания светового вектора?
7. Запишите формулу электрической силы действующую на электроны в атомах?
8. Каковы формулы колебаний электронного облака вещества? Дипольного момента?
9. Вывести формулу электронной теории дисперсии?

Решение типовых задач

16. 6. В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света $d=0,5\text{мм}$, расстояние до экрана $L=5\text{м}$. В зеленом свете получились интерференционные полосы, расположенные на расстоянии $l=5\text{мм}$ друг от друга. Найти длину волны λ зеленого света.

Решение:

Имеем $l = \frac{L}{d}\lambda$, откуда $\lambda = \frac{ld}{L} = 0,5 \cdot 10^{-6}\text{ м}$.

16. 15. Установка для получения колец Ньютона освещается белым светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы $R=5\text{м}$. Наблюдение ведется в проходящем свете. Найти радиусы r_c и $r_{кр}$ четвертого синего кольца ($\lambda_c = 400\text{ нм}$) и третьего красного кольца ($\lambda_{кр} = 630\text{ нм}$).

Решение:

Радиус светлого кольца в проходящем свете определяется формулой $r_k = \sqrt{k\lambda R}$. Отсюда $r_c = \sqrt{4\lambda_c R} = 2,8\text{мм}$; $r_{кр} = \sqrt{3\lambda_{кр} R} = 3,1\text{мм}$.

16. 28. Свет от монохроматического источника ($\lambda = 600\text{нм}$) падает нормально на диафрагму с диаметром отверстия $d=6\text{мм}$. За диафрагмой на расстоянии $l=3\text{м}$ от нее находится экран. Какое число k зон Френеля укладывается в отверстие диафрагмы? Каким будет центр дифракционной картины на экране: темным или светлым?

Решение:

Пусть в отверстии диафрагмы укладывается k зон Френеля, тогда радиус k -й зоны равен радиусу диафрагмы $r_k = \frac{d}{2} = \sqrt{dk\lambda}$. Отсюда $k = \frac{d^2}{4d\lambda} = 5$. Поскольку число открытых зон нечетно, то центр дифракционной картинке будет светлым.

16. 29. Найти радиусы r_k первых пяти зон Френеля, если расстояние от источника света до волновой поверхности $a = 1\text{ м}$, расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения $b = 1\text{ м}$. Длина волны света $\lambda = 500\text{нм}$.

Решение:

Радиус внешней границы k зон Френеля для сферической волны $r_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda}$. Подставляя числовые данные, получим $r_1 = 0,5\text{ мм}$, $r_2 = 0,71\text{ мм}$, $r_3 = 0,86\text{ мм}$, $r_4 = 1,0\text{ мм}$, $r_5 = 1,12\text{ мм}$.

16. 30. Найти радиусы r_k первых пяти зон Френеля для плоской волны, если расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения $b = 1$ м. Длина волны света $\lambda = 500$ нм.

Решение:

В случае плоской волны радиус k зон Френеля определяется по формуле $r_k = \sqrt{bk\lambda}$. Подставляя числовые данные, получим $r_1 = 0,71$ мм, $r_2 = 1$ мм, $r_3 = 1,22$ мм, $r_4 = 1,41$ мм, $r_5 = 1,58$ мм.

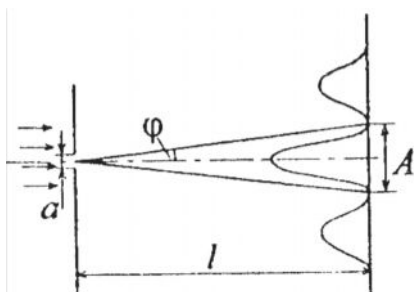
16. 31. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 600$ нм). На расстоянии $a = 0,5l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром $D = 1$ см. Найти расстояние l , если преграда закрывается только центральную зону Френеля.

Решение:

Радиус центральной (первой) зоны Френеля $r_1 = \sqrt{\frac{ab}{a+b}}\lambda$. Кроме того, $r_1 = \frac{d}{2}$. По условию

$a + b = l$; $a = b = 0,5l$, тогда $r_1 = \frac{d}{2} = 0,5\sqrt{l\lambda}$. Отсюда $l = \frac{d^2}{\lambda} = 167$ м.

16. 35. На щель шириной $a = 20$ мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света ($\lambda = 500$ нм). Найти ширину A изображения щели на экране, удаленном от щели на расстояние $l = 1$ м. шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещенности.



Решение:

Из рисунка видно, что $\frac{A}{2} = l \operatorname{tg} \varphi$. Поскольку угол φ мал, то можно принять $\operatorname{tg} \varphi = \sin \varphi$. Тогда $A = 2l \sin \varphi$ - (1). Условие максимумов интенсивности света $a \sin \varphi = k\lambda$, откуда при $k = 1$ $\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}$ - (2). Подставляя (2) в (1), получим

$$A = \frac{2l\lambda}{a} = 0,05 \text{ м.}$$

16. 36. На щель шириной $a = 6\lambda$ падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Под каким углом φ будет наблюдаться третий дифракционный минимум света?

Решение:

Имеем $a \sin \varphi = k\lambda$. По условию $a = 6\lambda$, $k = 3$. Отсюда $6\lambda \sin \varphi = 3\lambda$; $\sin \varphi = 0,5$; $\varphi = 30^\circ$.

16. 38. Какое число штрихов N_0 на единицу длины имеет дифракционная решетка, если зеленая линия ртути ($\lambda = 546,1$ нм) в спектре первого порядка наблюдается под углом $\varphi = 19^\circ 8'$?

Решение:

Согласно формуле дифракционной решетки $d \sin \varphi = k\lambda$. Поскольку число штрихов N_0 , приходящихся на единицу длины решетки, связано с периодом решетки d соотношением $N_0 = \frac{1}{d}$, то $\frac{\sin \varphi}{N_0} = k\lambda$, откуда $N_0 = \frac{\sin \varphi}{k\lambda} = 600 \text{ мм}^{-1}$.

16. 40. На дифракционной решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки. Какова должна быть постоянная d дифракционной решетки, чтобы в направлении $\varphi = 41^\circ$ совпадали максимумы линий $\lambda_1 = 656,3 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 410,2 \text{ нм}$?

Решение:

Имеем $\sin \varphi = \frac{k_1 \lambda_1}{d} = \frac{k_2 \lambda_2}{d}$, следовательно, $k_1 \lambda_1 = k_2 \lambda_2$. Отсюда $\frac{k_2}{k_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1,6$ - (1).

Поскольку числа k_1 и k_2 должны быть целыми, то из условия (1) найдем $k_1 = 5$ и $k_2 = 8$.

Тогда $d = \frac{k_1 \lambda_1}{\sin \varphi} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

16. 42. На дифракционной решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию λ_2 в спектре третьего порядка накладывается красная линия гелия ($\lambda_1 = 670 \text{ нм}$) спектра второго порядка?

Решение:

Имеем $d \sin \varphi = 2\lambda_1$; $d \sin \varphi = 3\lambda_2$. Отсюда $\lambda_2 = \frac{2}{3} \lambda_1 = 447 \text{ нм}$ – синяя линия спектра гелия.

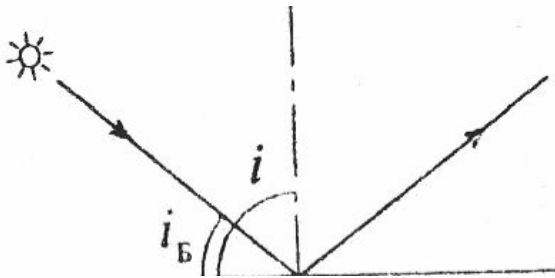
16. 59. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества $i = 45^\circ$. Найти для этого вещества угол i_B полной поляризации.

Решение:

Предельный угол полного внутреннего отражения для границы раздела вещество – воздух определяется соотношением $\sin i = \frac{1}{n}$. По условию $i = 45^\circ$, откуда $n = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1,4$. По закону

Брюстера $\text{tg} i_B = n$, откуда $i_B = \text{arctg}(n) = 54,7^\circ$.

16. 60. Под каким углом i_B к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были наиболее полно поляризованы?

**Решение:**

Пусть i - угол падения солнечных лучей, i_B - угол между направлением на Солнце и горизонтом. По закону Брюстера $\text{tg} i_B = n$, где $n = 1,33$ - показатель преломления воды. Тогда

$i = \text{arctg}(n) = 53^\circ$. Отсюда $i_B = 90^\circ - i = 37^\circ$.

16. 61. Найти показатель преломления n стекла, если при отражении от него света отраженный луч будет полностью поляризован при угле преломления $\beta = 30^\circ$.

Решение:

По закону Брюстера $\operatorname{tg} i_B = n$. В связи с обратимостью хода лучей можно записать $\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{n}$

откуда $n = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} = 1,73$.

16. 64. Найти угол φ между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, проходящего через поляризатор и анализатор, уменьшается в 4 раза.

Решение:

После прохождения через поляризатор луч имеет интенсивность $I_1 = 0,5I_0$, где I_0 - интенсивность естественного света. После прохождения через анализатор луч имеет интенсивность $I_2 = I_1 \cos^2 \varphi = 0,5I_0 \cos^2 \varphi$. По условию $\frac{I_2}{I_0} = 0,25$, тогда $\cos^2 \varphi = 0,5$ и

$\varphi = 45^\circ$.

Тех. редактор *Субанбердиева Н.Е.*

Подписано к печати 07.07.2011 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.

Бумага офс. Печать офс. Объем 5,75 п.л. Тираж 150 экз. Заказ 188.

Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ “Текник” КГТУ им. И.Раззакова, т.: 54-29-43
e-mail: beknur@mail.ru

