

ФИЗИКА

Учебник

Часть 1

11

Естественно-математическое
направление

Раздел I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Глава 1. Механические колебания

Глава 2. Электромагнитные колебания

Глава 3. Переменный ток

Раздел II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Глава 4. Волновое движение

Глава 5. Электромагнитные волны

Раздел III. ОПТИКА

Глава 6. Волновая оптика

Глава 7. Геометрическая оптика

Условные
обозначения:Практические
заданияТворческие
заданияЗадания для
развития
критического
мышленияВопросы для
самоконтроляЗадачи для
самостоятель-
ного решения■ Задания
средней
сложности* Задания
повышенной
сложностиМатериал для
дополнитель-
ного чтения

Предисловие

Дорогие учащиеся! 11 класс — последний год обучения в школе, поэтому вам необходимо приложить максимальные усилия, чтобы каждый день был предельно насыщенным и полезным для вас.

Школьное образование является фундаментом для освоения вами вершин профессиональных знаний. Книга, являясь завершающим в ряду учебников по классам, делает обзор пройденного ранее материала на более глубоком уровне и мотивирует к самостоятельному добыванию знаний. Если вы выбрали естественно-математическую или техническую специальность, то не ошиблись. В современном мире в ходе глобального развития цивилизации приоритетное место начинает занимать наука. Ее достижения дали начало таким новым отраслям, как инженерная генетика, атомная энергетика, лазерная техника, микроэлектроника, космическая техника, спутниковая система связи и пр. На данном этапе современной истории созданы новейшее оборудование, компьютеры, которые способствуют дальнейшему развитию человеческого интеллекта; быстрое развитие нанотехнологии и ее достижения стремительно меняют современный мир. Сегодня наука поднялась на более высокий уровень. Решающая заслуга в этом принадлежит физике, которая является основополагающей для многих других наук.

В настоящее время Казахстану необходимы собственные инженеры, ученые, конструкторы, т. е. специалисты именно в технических областях народного хозяйства. Но для этого вам необходимо серьезно работать, чтобы достичь поставленной цели. Материал учебника охватывает все разделы физики, которые вы изучали ранее, но освещает их на более высоком научном и методическом уровне, чтобы у вас создалось целостное представление о физике как о науке. “Упорный и терпеливый увидит благоприятный конец начатого дела, ищущий знания найдет его”. Знания становятся организующей основой мирового сообщества. Желаем успехов в достижении поставленной цели!

С уважением, авторы

Раздел I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Глава 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 1. Уравнения и графики механических гармонических колебаний



Ключевые понятия:

- ✓ колебания
- ✓ период, частота, амплитуда колебаний
- ✓ уравнения гармонических колебаний
- ✓ графики гармонических колебаний

На этом уроке вы:



- расширите и углубите свои знания о гармонических механических колебаниях;
- экспериментально, аналитически и графически изучите законы механических гармонических колебаний.

Колебательное движение. В природе и в повседневной жизни широко распространен особый вид процессов, в котором все его характеристики принимают одинаковое значение через равные промежутки времени. Такой процесс называется *периодическим*. В механике, если материальная точка (тело) движется вблизи положения равновесия, отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону, то такое периодическое движение называется *колебательным*. Таким образом, *колебательным* называется *периодический процесс, в котором любая физическая величина, характеризующая его, поочередно принимает то положительное, то отрицательное значение относительно положения устойчивого равновесия*. Вокруг нас постоянно происходят множество различных колебательных процессов: дети качаются на качелях, рабочий пользуется отбойным молотком, по мосту проходит транспорт, работают линии электропередач, люди разговаривают, поют, играют на струнных инструментах (рис 1.1).

С понятием колебаний и некоторыми их характеристиками вы познакомились в 9 классе.

Это вы знаете

Движения, или процессы, которые через более или менее равные промежутки времени регулярно повторяются, называются колебаниями. *Колебания — это периодический процесс.*

По физической природе периодического процесса колебания делятся на механические и электромагнитные. Оказалось, что законы изменения характеристик колебаний различной природы одинаковы, они могут быть



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1.1. Примеры колебаний различной природы

описаны одинаковыми уравнениями. Колебательные движения различной природы характеризуются одними и теми же параметрами. Поэтому мы будем изучать в этой главе сначала механические, потом по аналогии электромагнитные колебания.

Это вы знаете

Основные характеристики колебаний:

Период колебаний T — это минимальный промежуток времени, в течение которого совершается одно полное колебание. Измеряется в секундах.

Частота колебаний ν — это число колебаний в одну секунду, величина, обратная периоду: $\nu = \frac{1}{T}$. Измеряется в герцах (Гц), имеет размерность с^{-1} .

Амплитуда колебаний x_m — это максимальное значение, которое может принять изменяющаяся физическая величина.

*Физическая система, в которой могут существовать свободные колебания, называется **колебательной системой**.*

Колебательная система, выведенная из равновесия и предоставленная сама себе, совершает свободные (собственные) колебания. Частота (период) таких колебаний определяется физическими параметрами колебательной системы.

Механические гармонические колебания. Механическими колебаниями называются периодические (или почти периодические) изменения физической величины, описывающей механическое движение (скорость, смещение, кинетическая и потенциальная энергия и т. п.). Механические колебания совершает тяжелый небольшой шарик, подвешенный на длинной нити, если нить отклонить от вертикали. Любое твердое тело, подвешенное выше его центра тяжести, также начинает колебаться, если его отклонить от положения равновесия и отпустить.



Внимательно понаблюдайте за процессами, происходящими вокруг вас, и выделите из них механические колебания. Аргументируйте свои выводы.

Равномерное движение материальной точки по окружности также является периодическим, так как через каждый полный оборот она возвращается в исходное положение. При этом проекция материальной точки на плоскость, перпендикулярную плоскости окружности, будет совершать колебания.



Возьмем маленький шарик со сквозным отверстием, через это отверстие привяжем шарик к концу тонкой прочной нити длиной около 50 см и будем вращать его, взявшись за второй конец нити. Экран расположим в плоскости, перпендикулярной плоскости окружности. Установку будем освещать, как показано на рисунке (рис. 1.2).

В нашем опыте, как видно из рисунка, движение шарика происходит против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω_0 . Нарисуем схему этого опыта (рис. 1.3). Здесь движение шарика происходит в плоскости чертежа, экран расположен перпендикулярно плоскости рисунка, где находится ось OX .

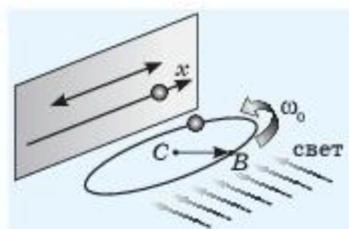


Рис. 1.2

Проекцию центра окружности C на оси OX обозначим буквой O , тогда проекция движущейся материальной точки B будет совершать колебания около точки O , ее отклонение от положения равновесия (точка O) в данный момент времени обозначим буквой x , а максимальное отклонение обозначим через $x_m = R$. Выясним, как изменяется x с течением времени. Как видно из рисунка 1.3,

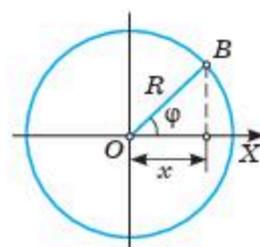


Рис. 1.3. Схема опыта "Движение по окружности и колебания"

$$x = R \cos \varphi. \quad (1.1)$$

Так как точка B совершает равномерное движение по окружности, ее угловая скорость $\omega_0 = \frac{\varphi}{t}$; Если в начальный момент времени $t_0 = 0$ положение точки B на окружности соответствует углу φ_0 , тогда в момент времени t :

$$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0.$$

Подставив это выражение в (1.1), получим:

$$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1.2)$$

Таким образом, при равномерном вращении материальной точки B по окружности координата x (смещение) ее проекции на плоскость, перпендикулярную плоскости окружности, будет периодически изменяться по закону косинуса от $x_m = R$ до $-x_m = R$, т.е. совершает колебательное движение вдоль оси X . Если в нашем опыте экран расположим вертикально, то проекция движущейся по окружности материальной точки B на вертикальную ось будет также совершать колебания около положения равновесия согласно уравнению:

$$x = x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1.3)$$

Периодические изменения физической величины, происходящие по закону синуса или косинуса в зависимости от времени, называются гармоническими колебаниями.

Выражения (1.2) и (1.3) являются уравнениями гармонических колебаний. В зависимости от начальных условий можно выбрать, каким из этих двух уравнений удобнее пользоваться.

В этих уравнениях: x — смещение, x_m — амплитуда колебаний, ω_0 — циклическая или круговая частота собственных колебаний, t — время. Величина, стоящая под знаком косинуса $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$, называется *фазой гармонического колебания*.

При $t = 0$, $\varphi = \varphi_0$, поэтому φ_0 называют *начальной фазой*.

В механических колебаниях изменяющейся величиной могут быть: смещение x тела от положения равновесия, скорость, ускорение, механическая энергия.

Рассмотрим графики гармонических колебаний при различных значениях амплитуды колебаний x_m , периода T (или частоты ν), а также начальной фазы φ_0 (рис. 1.4).

На рисунке 1.4, а представлены графики уравнения (1.2) для двух разных значений амплитуды колебаний $x_{1m} > x_m$ с одинаковыми значениями периода колебаний и начальной фазы $\varphi_0 = 0$.

Графики гармонических колебаний на рисунке 1.4, б отличаются только значениями периода колебаний $T = 2T_1$.

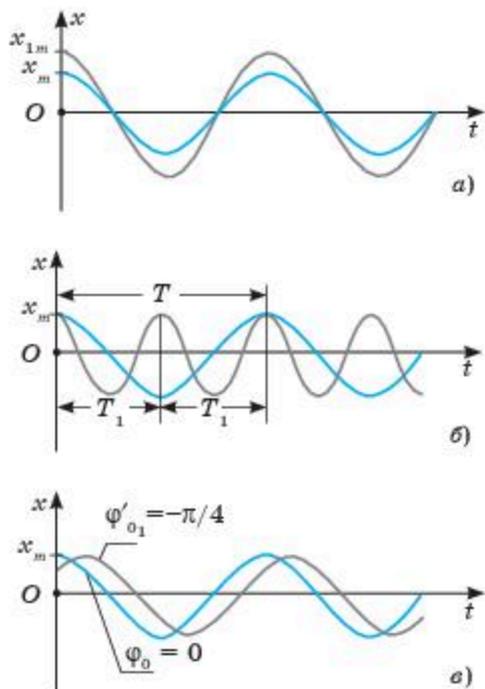


Рис. 1.4. Графики гармонических колебаний

На рисунке 1.4, *в* представлены графики гармонических колебаний с разными значениями начальной фазы.

Если материальная точка совершает гармонические колебания, то при этом периодически изменяются также ее скорость и ускорение. Определим законы изменения скорости и ускорения. Пусть колебания материальной точки происходят вдоль оси X , тогда вектор скорости будет направлен вдоль этой оси и скорость можно определить как производную от смещения:

$$v = v_x = x'(t) = -\omega_0 x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \omega_0 x_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$v = v_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (1.4)$$

Здесь $v_m = \omega_0 x_m$ — амплитуда колебаний скорости.

Сравнивая выражения (1.2) и (1.4), можно увидеть, что колебания скорости опережают колебания смещения по фазе на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 1.5, *а* и *б*). Это означает, что максимальные по модулю значения скорости достигаются в те моменты времени, когда тело проходит через положения равновесия ($x = 0$).

Ускорение $a = a_x$ тела при гармонических колебаниях определяется как производная от скорости:

$$a = v'(t) = -\omega_0^2 x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 x(t). \quad (1.5)$$

Формулу (1.5) можно привести к виду:

$$a = a_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi). \quad (1.6)$$

Здесь $a_m = \omega_0^2 x_m$ амплитуда колебаний ускорения материальной точки.

Знак “-” в выражении (1.5) означает, что ускорение $a(t)$ всегда имеет знак, противоположный знаку смещения $x(t)$, следовательно, по второму закону Ньютона сила, заставляющая тело совершать гармонические колебания, направлена всегда в сторону положения равновесия ($x = 0$).

Сравнивая выражения (1.2) и (1.6) приходим к выводу, что колебания смещения и ускорения колеблющейся точки всегда происходят в противофазе (рис. 1.5, *а* и *в*).

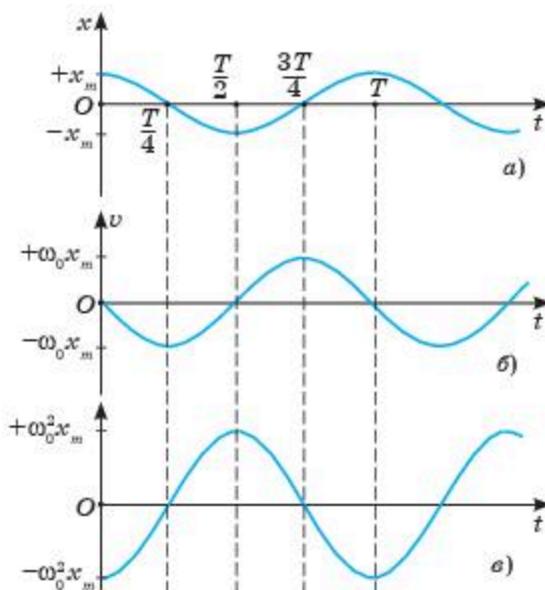


Рис. 1.5. Графики колебаний смещения, скорости и ускорения тела, совершающего гармонические колебания.

Энергия механических колебаний. В процессе механических колебаний происходит непрерывное превращение кинетической энергии колебательной системы в потенциальную энергию, и обратно.

Определим кинетическую энергию по известной формуле: $E_k = \frac{mv^2}{2}$.

Подставим сюда скорость колебаний $v = x'(t) = -x_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$:

$$E_k = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0),$$

Учитывая соотношение $\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$, найдем:

$$E_k = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Отсюда вывод: в процессе механических колебаний кинетическая энергия системы совершает также гармонические колебания с частотой, в два раза превышающей частоту самих колебаний. Потенциальную энергию определим по формуле: $E_p = \frac{kx^2}{2}$. Подставив сюда

$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, получим: $E_p = \frac{kx_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$; учитывая, что $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$;

$k = \omega_0^2 m$, $\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$, получим:

$$E_p = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{4} [1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Таким образом, потенциальная энергия системы также изменяется с циклической частотой, равной $2\omega_0$.

Определим полную энергию системы:

$$E = E_k + E_p = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0) + 1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Отсюда:

$$E = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{2}. \quad (1.7)$$

Полная энергия системы не зависит от времени и для гармонических колебаний является постоянной величиной.

Запомните

Мы рассмотрели закономерности свободных гармонических колебаний идеальной колебательной системы, в которой отсутствует рассеяние энергии. В реальных колебательных системах всегда в той или иной мере происходит рассеяние энергии колебаний и постепенно колебания затухают.



1. Как можно отличить колебания от всех других видов движения?
2. Приведите примеры колебательных процессов.
3. Какие колебания называются гармоническими?
4. Напишите уравнение гармонических колебаний.
5. Что называют амплитудой колебаний? Периодом? Частотой?
6. Каким соотношением связаны между собой частота ν колебаний и циклическая частота ω_0 ?
7. Объясните, чем отличаются друг от друга колебания, представленные на рисунке 1.3?
8. Как изменяются скорость и ускорение материальной точки в процессе гармонических колебаний?
9. Расскажите о превращениях энергии в процессе механических гармонических колебаний.
10. В начальный момент времени $t_0 = 0$ смещение материальной точки от положения равновесия равно амплитуде колебаний. Каким из уравнений (1.2) или (1.3) удобнее воспользоваться для описания гармонических колебаний этой точки?



Рассмотрите картинки на рисунке 1.1. Расскажите, какие колебания происходят в каждом примере, и объясните какова их природа. Напишите краткий рассказ.



1. Из приведенного на рисунке 1.6 графика определите амплитуду, период и частоту, начальную фазу колебаний.
2. Напишите уравнение колебаний.
3. Из уравнения колебаний получите уравнения колебаний скорости и ускорения.
4. Определите амплитудные значения скорости и ускорения.
5. Постройте графики уравнений: $v = v(t)$ и $a = a(t)$.

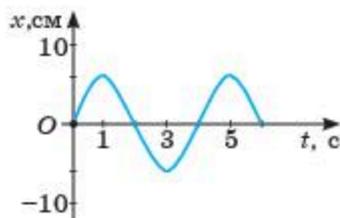


Рис. 1.6

Примеры решения задач

1. Уравнение колебаний материальной точки: $x = 7 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ см.

Определите амплитуду, начальную фазу, период колебаний. Определите скорость и ускорение материальной точки в момент времени $t = 2$ с?

Дано:

$$x = 7 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right) \text{ см}$$

$$t = 2 \text{ с}$$

$$x_m \text{ — ? } \varphi_0 \text{ — ? } T \text{ — ?}$$

$$a \text{ — ? } v \text{ — ?}$$

Решение. Сравнив уравнение колебаний, данное в условии задачи с уравнением гармонических колебаний $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$

легко определить: $x_m = 7$ см, $\varphi_0 = \frac{\pi}{3}$, $\omega_0 = \pi$,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{6,28}{3,14 \text{ с}^{-1}} = 2 \text{ с.}$$

Уравнение скорости колебаний материальной точки:

$$v = x'(t) = -x_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -7\pi \sin\left(2\pi + \frac{\pi}{3}\right);$$

$$v = -22 \cdot 0,87 = -19 \text{ см/с.}$$

Знак “-” указывает на то, что в момент времени $t = 2$ с направление скорости совпадает с отрицательным направлением оси x .

Определим ускорение:

$$a = v'(t) = -\omega_0^2 x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 x(t);$$

$$a = -\pi^2 \cdot 7 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right) = -9,86 \cdot 7 \cos\left(2\pi + \frac{\pi}{3}\right) = -34,5 \text{ см/с}^2.$$

Знак “-” указывает на то, что ускорение направлено против направления смещения, т. е. в сторону положения равновесия.

Ответ: -19 см/с , $-34,5 \text{ см/с}^2$.

2. Тело массой 5 г совершает колебание, которое описывается уравнением $x = 0,1 \sin \frac{\pi}{2} \left(t + \frac{1}{3}\right)$ м. Найти значение кинетической и потенциальной энергии тела через 20с от начала колебаний.

Дано:

$$x = 0,1 \sin \frac{\pi}{2} \left(t + \frac{1}{3}\right) \text{ м}$$

$$m = 5 \text{ г} = 0,005 \text{ кг}$$

$$t = 20 \text{ с}$$

$$E_k \text{ — ? } E_p \text{ — ? } E \text{ — ?}$$

Решение. Для определения кинетической энергии воспользуемся известной формулой:

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

Сначала определим скорость:

$$v = x'(t) = -0,1 \frac{\pi}{2} \cos \frac{\pi}{2} \left(t + \frac{1}{3}\right),$$

отсюда:

$$E_k = \frac{m}{2} \left[-0,1 \frac{\pi}{2} \cos \frac{\pi}{2} \left(t + \frac{1}{3}\right)\right]^2 = 0,01 \frac{m\pi^2}{8} \cos^2 \left(10\pi + \frac{\pi}{6}\right) = 0,01 \frac{m\pi^2}{8} \left(\cos^2 \frac{\pi}{6}\right)^2;$$

$$E_k = 0,01 \frac{0,005 \cdot 9,86}{8} \cdot (0,87)^2 = 47 \text{ мкДж.}$$

Определим потенциальную энергию. Из уравнения, данного в условии задачи видно, что $\omega_0 = \frac{\pi}{2}$. Известно, что $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$; $k = \omega_0^2 m$:

$$E_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega_0^2}{2} \cdot 0,01 \sin^2 \left(10\pi + \frac{\pi}{6}\right) = \frac{m\omega_0^2}{2} \cdot 0,01 \sin^2 \frac{\pi}{6}.$$

$$E_p = \frac{0,01 \cdot (3,14)^2 \cdot 0,005}{8} = 15 \text{ мкДж.}$$

Полную энергию колебаний сначала определим по формуле (1.7):

$$E = \frac{m\omega_0^2 x_m^2}{2} = \frac{0,005 \cdot 0,01 \cdot 2,46}{2} = 62 \text{ мкДж.}$$

С другой стороны: $E = E_k + E_p = 47 \text{ мкДж} + 15 \text{ мкДж} = 62 \text{ мкДж}$.
В обоих случаях получили одинаковый результат.

Ответ: $E_k = 47 \text{ мкДж}$, $E_p = 15 \text{ мкДж}$, $E = 62 \text{ мкДж}$.



Упражнение 1

1. Материальная точка за промежуток времени $\Delta t = 1,0$ мин совершила $N = 120$ колебаний. Определите период T , частоту ν и циклическую частоту ω_0 колебаний материальной точки.

Ответ: 0,5 с; 2 Гц; 12,56 рад/с.

2. Уравнение колебаний материальной точки имеет вид: $x = 5 \cos \pi t$ см. Найдите амплитуду, период и частоту колебаний.

Ответ: 5 см; 2 с; 0,5 Гц.

3. Уравнение гармонического колебания: $x = 0,15 \cos(0,6\pi t + \pi/3)$ м. Определите амплитуду, начальную фазу и период колебаний.

Ответ: $T = 3,3$ с.

- *4. Напишите уравнение и нарисуйте график гармонического колебания, если амплитуда колебаний равна 7 см, частота колебаний 0,5 Гц, начальная фаза равна нулю.

Ответ: $x = 7 \cos \pi t$ (см).

- *5. Когда фаза колебаний равна $\frac{\pi}{3}$, смещение равно 1 см. Определите смещение в момент, когда фаза колебаний равна $\frac{3\pi}{4}$, а также амплитуду колебаний.

Ответ: $x = -1,4$ см; $x_m = 2$ см.

- *6. Начальная фаза гармонических колебаний, происходящих по закону косинуса, равна $\varphi_0 = -\pi$. Амплитуда колебаний равна 6 см, а циклическая частота равна $\omega_0 = 3\pi$ рад/с. Каково было смещение точки от положения равновесия в начальный момент времени?

Ответ: $x = -6$ см.

- *7. Тело совершает гармонические колебания с амплитудой 0,1 м, частотой 2 Гц. Какова масса тела, если полная энергия колебаний равна 7,7 мДж?

Ответ: 0,0097 кг.

§ 2. Математический и пружинный маятники



Ключевые понятия:

- ✓ положение равновесия
- ✓ смещение
- ✓ математический маятник
- ✓ период колебаний математического маятника
- ✓ пружинный маятник
- ✓ период колебаний пружинного маятника

На этом уроке вы:

- аналитически и экспериментально исследуете колебания математического и пружинного маятников.



Как мы выяснили в предыдущем параграфе, колебания материальной точки всегда происходят с ускорением. Нам известно, что ускорение тела обусловлено действием силы.

Запишем второй закон Ньютона в проекции на ось Ox :

$$F_x = ma_x = -m\omega_0^2 x, \quad (2.1)$$

(см. уравнение 1.5).

Из (2.1) видно, что при гармонических колебаниях проекция силы F_x , действующей на тело, пропорциональна его смещению от положения равновесия. Знак “минус” указывает на “возвратный” характер возникающей силы. Итак, появление возвращающей силы при отклонении тела от положения равновесия, является необходимым условием возникновения колебаний. Положению равновесия колеблющегося тела соответствует точка, в которой равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю. Координату этой точки, как правило, принимают равной нулю.

Математический маятник является моделью колебательной системы, совершающей гармонические колебания.

Это вы знаете

Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на нерастяжимой и невесомой нити, находящуюся в поле силы тяжести.

На практике математическим маятником может служить тело небольших размеров, подвешенное на тонкой нерастяжимой нити, масса которой пренебрежимо мала по сравнению с массой тела (рис. 2.1).

В положении равновесия, когда маятник висит по отвесу, сила тяжести $m\vec{g}$ уравновешивается силой натяжения нити \vec{T} . При откло-

нении маятника от положения равновесия на некоторый угол α появляется касательная составляющая силы тяжести $F_{\tau} = -mg \sin \alpha$. Знак “-” в этой формуле означает, что касательная составляющая направлена в сторону, противоположную отклонению маятника.

Запишем второй закон Ньютона для проекций векторов ускорения и силы на направление касательной: при малых значениях угла отклонения, когда α не превышает значений $(15 - 20)^\circ$, справедливо соотношение: $\sin \alpha \approx \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha = \frac{x}{l}$. Таким образом, для малых колебаний математического маятника второй закон Ньютона можно записать в виде:

$$ma_{\tau} = -m \frac{g}{l} x.$$

Определим тангенциальное ускорение как вторую производную от смещения и введем обозначение:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (2.2)$$

Тогда предпоследнее выражение можно записать в виде:

$$x'' + \omega_0^2 x = 0. \quad (2.3)$$

Из уравнения (2.3) видно, что вторая производная от смещения по времени с точностью до постоянной ω_0^2 равна смещению с противоположным знаком. Таким свойством обладают периодические функции синус и косинус. Действительно, из курса математики известно, что решением этого дифференциального уравнения второго порядка является уравнение (1.2), т. е. при малых колебаниях математический маятник совершает гармонические колебания и система является гармоническим осциллятором.

Формула (2.2) выражает *собственную частоту малых колебаний математического маятника*. Следовательно, период колебаний математического маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (2.4)$$

Это — **формула Гюйгенса**. Период собственных колебаний математического маятника определяется только его длиной и не зависит ни от амплитуды колебаний, ни от угла отклонения нити маятника от вертикали (при малых углах).

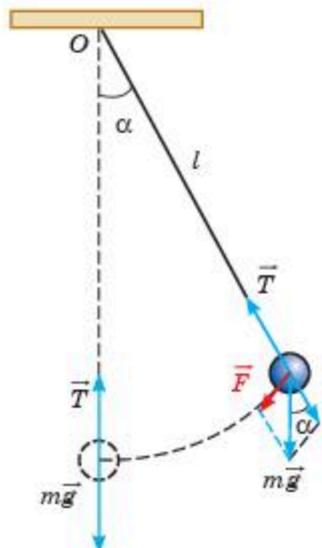


Рис. 2.1. Математический маятник

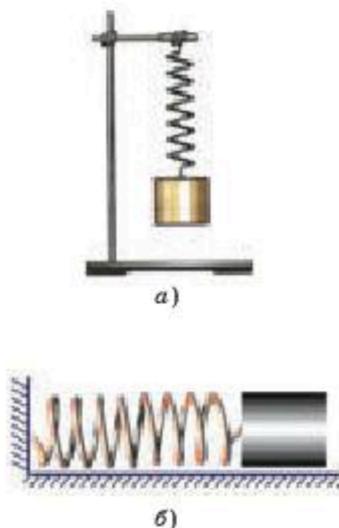


Рис. 2.2. Пружинные маятники: а) вертикальный, б) горизонтальный

Пружинный маятник. *Пружинный маятник* — это колебательная система, состоящая из абсолютно упругой, невесомой пружины и материальной точки (маленького массивного тела) массы m . Пружинный маятник может быть вертикальным (рис. 2.2, а) или горизонтальным (рис. 2.2, б).

Рассмотрим горизонтальный пружинный маятник (рис. 2.3). Шарик, просверленный по диаметру, насажен на горизонтальный стержень, вдоль которого он может скользить без трения. Стержень закреплен между двумя вертикальными опорами.

К шарикку одним концом прикреплена невесомая пружина, другой ее конец закреплен на опоре. Когда пружина не деформирована, шарик находится в положении равновесия C . Если, растянув или сжав пружину, выве-

сти шарик из положения равновесия, то со стороны пружины на него начнет действовать сила упругости, всегда направленная к положению равновесия. Пусть мы сжали пружину и отпустили. Под действием силы упругости шарик станет двигаться к положению равновесия с ускорением $a = \frac{F_{\text{упр.}}}{m}$, где m — масса шарика. При небольших деформациях пружины справедлив закон Гука: $F_{\text{упр.}} = -kx$, откуда: $a = \frac{F_{\text{упр.}}}{m} = -\frac{k}{m}x$. Ускорение шарика найдем как вторую производную от смещения и введем обозначение:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}. \quad (2.5)$$

Тогда ускорение $a = -\frac{k}{m}x$ можно привести к виду: $x'' + \omega_0^2 x = 0$.

Мы получили знакомое нам уравнение (2.3). Отсюда делаем вывод: *малые колебания пружинного маятника также являются гармоническими*. В формулу периода колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ подставим выражение (2.5) и получим формулу периода собственных колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (2.6)$$

Запомните

Период собственных колебаний пружинного маятника определяется только его параметрами m и k и не зависит от амплитуды колебаний.

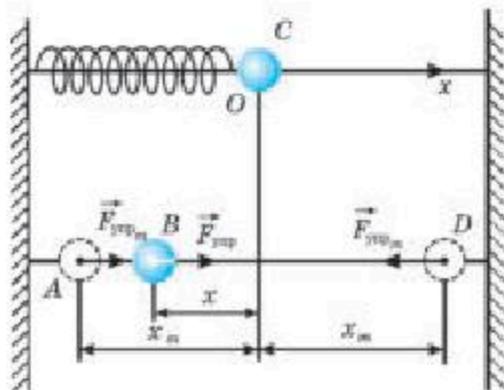


Рис. 2.3. Схематическое изображение горизонтального пружинного маятника

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Маятник Фуко — это экспериментальный прибор, с помощью которого можно наглядно наблюдать суточное вращение Земли (рис. 2.4.).

Его изобрел французский физик, член Парижской Академии наук, Жан Бернар Леон Фуко (родился в Париже 18 сентября 1819 года).

Впервые Жан Фуко продемонстрировал свой эксперимент 8 января 1851 года под куполом Пантеона в Париже. Маятник Фуко представляет собой стальную проволоку длиной 67м.

К концу проволоки Фуко прикрепил груз весом 28 кг, а на нижней стороне груза закрепил металлический стержень и повесил маятник к вершине купола Пантеона. Под маятником соорудили круглое ограждение диаметром примерно в три метра, центр которого находился ровно под острием стержня, и насыпали на него песок. Маятник отклонили от вертикали и отпустили, он начал колебаться, сбрасывая острием стержня песок при прохождении стержня через ограждение. Самое интересное — при каждом последующем качании он сбрасывал песок примерно в трех миллиметрах от предыдущего места. Это означает, что плоскость колебаний маятника относительно пола поворачивается по часовой стрелке. Примерно за 32 часа плоскость колебаний совершила полный оборот и вернулась в прежнее положение. Почему так происходит? На круге из песка есть точка, максимально близкая к северному полюсу — а значит, она ближе к земной оси, чем центр. При повороте Земли на 360° северный край кольца будет двигаться по кругу меньшего радиуса, чем центр, и за сутки пройдет меньшее расстояние. Эту разницу и отражает маятник Жан Фуко. Таким образом, с помощью эксперимента Фуко было наглядно продемонстрировано суточное вращение Земли. В разное время маятники Фуко были установлены: в Исаакиевском соборе (Санкт-Петербург), японском городе Нагасаки в храмовом комплексе Фукусайдзи, в базилике Сан-Петронио (Болонья), в костеле Святых Иоаннов (Вильнюс) и т.д.



Рис. 2.4. Маятник Фуко в Парижском Пантеоне



1. От каких физических величин зависит период собственных колебаний математического маятника?
2. От каких физических величин зависит период собственных колебаний пружинного маятника?
3. Как из подручных средств можно сделать математический маятник?
4. Можно ли самостоятельно сконструировать пружинный маятник? Объясните как.
5. При выполнении каких условий колебания математического маятника будут гармоническими? Ответ обоснуйте.
6. При выполнении каких условий колебания пружинного маятника будут гармоническими? Ответ обоснуйте.



- По указанию учителя разделитесь по группам по 4-5 человек и выполните задания:
1. Исследуйте, как зависит период колебаний математического маятника от массы маятника, от амплитуды колебаний и длины маятника. Маятник сделайте своими руками из предоставленных вам предметов. Составьте план эксперимента. Результаты опытов занесите в составленные вами таблицы. Сделайте выводы.
 2. Исследуйте, как зависит период колебаний пружинного маятника от массы маятника, жесткости пружины, амплитуды колебаний маятника. Маятник сделайте своими руками из предоставленных вам предметов. Составьте план эксперимента. Результаты опытов занесите в составленные вами таблицы. Сделайте выводы.



Длина математического маятника увеличивается, масса пружинного маятника уменьшается. Как при этом изменяются остальные параметры? Заполните таблицу 2.1., используя слова: уменьшится, увеличится, не изменится.

Таблица 2.1

Маятник	Амплитуда	Период	Частота	Полная энергия
Математический				
Пружинный				

Примеры решения задач

1. Период колебаний первого математического маятника $T_1 = 3$ с, а второго — $T_2 = 4$ с. Определите период колебаний математического маятника, длина которого равна сумме длин этих маятников.

Дано:

$$T_1 = 3 \text{ с}$$

$$T_2 = 4 \text{ с}$$

$$l = l_1 + l_2$$

$$T = ?$$

Решение. Для каждого маятника запишем формулу периода колебаний:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}; \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Из первых двух формул найдем:

$$l_1 = \frac{T_1^2 \cdot g}{4\pi^2}; \quad l_2 = \frac{T_2^2 \cdot g}{4\pi^2}.$$

Тогда: $l_1 + l_2 = \frac{g}{4\pi^2}(T_1^2 + T_2^2).$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{g}{4\pi^2}(T_1^2 + T_2^2) \cdot \frac{1}{g}} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}.$$

$$T = \sqrt{9 + 16} = 5 \text{ с.}$$

Ответ: 5 с.

2. Периоды колебаний математического и пружинного маятников одинаковы. Коэффициент жесткости пружины $k = 20 \text{ Н/м}$. Какова масса груза пружинного маятника, если длина нити математического маятника $l = 0,4 \text{ м}$?

Дано:

$$k = 20 \text{ Н/м}$$

$$l = 0,4 \text{ м}$$

$$T_1 = T_2$$

$$m = ?$$

Решение: Запишем формулы периода колебаний математического и пружинного маятников:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Так как периоды колебаний одинаковы, то $\frac{l}{g} = \frac{m}{k}$.
Отсюда: $m = \frac{kl}{g} = \frac{20 \cdot 0,4}{9,8} = 0,8 \text{ кг.}$

Ответ: 0,8 кг.



Упражнение 2

1. Какую длину имеет математический маятник с периодом колебаний $T = 2 \text{ с}$?

Ответ: $l \approx 1 \text{ м}$.

2. Длину нити математического маятника увеличили в два раза. Во сколько раз в результате изменилась частота колебаний?

Ответ: уменьшилась в 1,41 раза.

3. За одно и то же время один математический маятник совершил $n_1 = 20$, а второй маятник — $n_2 = 40$ колебаний. Как соотносятся их длины?

Ответ: $l_1/l_2 = 4$.

4. Математический маятник совершает гармонические колебания с амплитудой 6 см. Какую часть периода шарик маятника находится не далее 3 см от положения равновесия?

Ответ: 1/3 периода.

5. Маятниковые часы идут правильно, если длина его маятника равна $l_1 = 0,52 \text{ м}$. На какое время отстанут часы за сутки, если длина маятника будет равна $l_2 = 0,56 \text{ м}$?

Ответ: на 54 мин.

6. Шарик массой 0,2 кг, подвешенный на пружине, колеблется с частотой $\nu = 5$ Гц. Определите коэффициент упругости пружины.

Ответ: 197 Н/м.

7. Определите период колебаний пружинного маятника, если его масса 0,2 кг, а жесткость пружины 20 Н/м.

Ответ: 0,63 с.

8. Как изменится период колебаний пружинного маятника, если его массу уменьшить в 4 раза?

Ответ: уменьшится в 2 раза.

9. Пружинный маятник делает 30 колебаний за 15 с. Определите массу груза, если жесткость пружины $k = 175$ Н/м.

Ответ: $m = 1,1$ кг.

- *10. Медный шарик, подвешенный на пружине, совершает гармонические колебания. Как изменится период колебаний маятника, если медный шарик заменить алюминиевым такого же радиуса?

Ответ: $T_1/T_2 = 1,8$.

Самое важное в главе 1

• Периодические изменения физической величины, происходящие по закону синуса или косинуса в зависимости от времени, называются *гармоническими колебаниями*:

$$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

или

$$x = x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

- Период колебаний математического маятника: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.
- Период колебаний пружинного маятника: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.
- Полная механическая энергия для гармонических колебаний:

$$E = \frac{mx_m^2\omega_0^2}{2}.$$

Глава 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

§3. Свободные электромагнитные колебания



Ключевые понятия:

- ✓ электромагнитные колебания
- ✓ катушка
- ✓ конденсатор
- ✓ колебательный контур
- ✓ энергия электрического поля
- ✓ энергия магнитного поля
- ✓ электродвижущая сила самоиндукции

На этом уроке вы:

- изучите условия возникновения свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре;
- познакомитесь с закономерностями изменения электромагнитной энергии с течением времени в колебательном контуре.



Это вы знаете

Большинство колебаний, которые мы видим вокруг, разделяются на механические и электромагнитные. Законы изменения характеристик колебаний различной природы одинаковы, они могут быть описаны одинаковыми уравнениями. Колебательные движения различной природы характеризуются одними и теми же параметрами.

Перейдем теперь к изучению электромагнитных колебаний. Электромагнитные колебания имеют важное практическое значение.

На использовании электромагнитных колебаний основана выработка электрической энергии, вся электротехника и радиоэлектроника, работа всех современных радиотехнических устройств и т. д. В электромагнитных колебаниях периодически изменяются: величина заряда, напряжение, сила тока, напряженность электрического поля, индукция магнитного поля и другие электродинамические величины.

Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре. *Электромагнитными колебаниями называются периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, сопровождающиеся взаимными превращениями энергии электрического и магнитного полей.*

Свободные электромагнитные колебания можно возбудить, подключив заряженный конденсатор к катушке индуктивности. В такой колебательной системе возникают затухающие колебания, так как сообщенная системе энергия расходуется на нагревание и излучение электромагнитных волн (рис. 3.1).

Чтобы установить основные закономерности возбуждения и протекания свободных электромагнитных колебаний, сначала сопротивления



Рис. 3.1. Колебательный контур

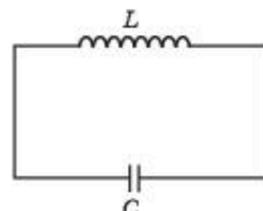
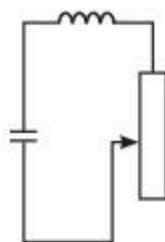


Рис. 3.2. Обозначение колебательного контура в схемах

катушки и соединительных проводов примем равными нулю, т. е. рассмотрим так называемый *идеальный колебательный контур*, состоящий только из катушки индуктивности L и конденсатора емкости C .

Замкнутая электрическая цепь, состоящая из конденсатора емкости C и катушки индуктивности L , называется колебательным контуром (рис. 3.2).

В начальный момент времени зарядим конденсатор, подключив к нему источник постоянного напряжения, при этом обкладкам конденсатора сообщаются заряды $\pm q_m$, и между ними возникает *электрическое поле*, энергия которого в данный момент максимальна и равна (рис. 3.3, а):

$$W_{\text{э}} = \frac{q_m^2}{2C}. \quad (3.1)$$

После замыкания заряженного конденсатора на катушку индуктивности конденсатор начнет разряжаться (рис. 3.3, б) и по катушке пойдет нарастающий ток в направлении от положительной обкладки конденсатора к отрицательной.

С ростом силы тока в контуре возрастает и индукция магнитного поля катушки, что обуславливает возникновение *электродвижущей силы (ЭДС) самоиндукции*. По правилу Ленца ток самоиндукции направлен противоположно возрастающему току разрядки (рис. 3.3, б), в результате чего сила тока разрядки увеличивается медленнее (рис. 3.4)

С увеличением силы тока в контуре энергия магнитного поля $W_{\text{м}} = \frac{Li^2}{2}$ растет, а энергия электрического поля конденсатора $W_{\text{э}} = \frac{q^2}{2C}$ уменьшается (рис. 3.3, б). Полная энергия электромагнитного поля в любой момент времени равна их сумме:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}, \quad (3.2)$$

здесь i — мгновенное значение силы тока.

По мере разрядки конденсатора нарастание силы тока, а значит, и индукции магнитного поля катушки идет все медленнее. Когда кон-

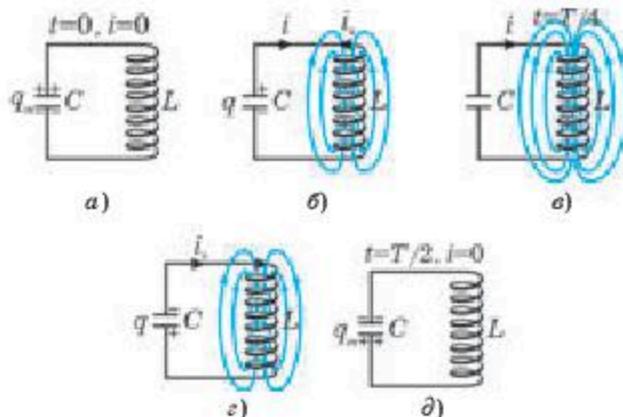


Рис. 3.3. Возникновение свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре

денсатор полностью разрядится, ЭДС самоиндукции достигнет нуля, а сила тока и индукция магнитного поля станут максимальными. Этому моменту времени соответствуют рисунок 3.3, *в* и точка 1 на рисунке 3.4. Энергия магнитного поля в этот момент также максимальна и равна $W_M = \frac{LI_m^2}{2}$, где I_m — максимальное значение силы тока, при этом энергия электрического поля равна нулю ($W_E = 0$).

Далее сила тока, а значит, и магнитное поле начинают уменьшаться, опять возникает ЭДС самоиндукции. При этом ток самоиндукции течет в направлении тока в контуре, так как по правилу Ленца ток самоиндукции должен поддерживать уменьшающийся ток (рис. 3.3, *г*; участок 1—2 на рис. 3.4). Конденсатор начинает перезаряжаться. Уменьшение силы тока идет все быстрее, ЭДС самоиндукции возрастает и достигает максимума в момент исчезновения тока (рис. 3.3, *д*; точка 2 на рис. 3.4).

Мы подробно описали процессы, происходящие за половину периода электромагнитных колебаний. Далее процесс пойдет в обратном направлении. По истечении одного периода система возвратится в исходное состояние, и в дальнейшем процесс будет периодически повторяться. При этом происходит периодическое превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля и наоборот. С самого начала мы приняли сопротивление $R = 0$; в таком идеальном контуре потерь энергии нет и колебания являются незатухающими. Полная энергия сохраняется и в любой момент равна:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} \text{ или } \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \text{const.} \quad (3.3)$$

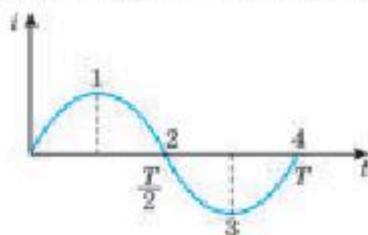


Рис. 3.4. График зависимости силы тока в контуре от времени

Уравнение свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре. Рассмотренные нами свободные колебания в идеальном колебательном контуре являются незатухающими гармоническими колебаниями, так как мы приняли, что электрическое сопротивление контура $R = 0$. Выведем уравнение, описывающее свободные электромагнитные колебания в таком контуре. Как мы уже знаем, полная энергия колебаний в идеальном колебательном контуре:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \text{const.} \quad (3.4)$$

Возьмем производную по времени от полной энергии. Учитывая, что производная постоянной величины равна нулю, имеем:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0. \quad (3.5)$$

Так как первая производная по времени определяет скорость изменения данной величины, из последнего выражения следует, что *скорость возрастания энергии магнитного поля равна скорости убывания энергии электрического поля.*

Последнее выражение можно привести к виду:

$$Li \cdot i' + \frac{q}{C} q' = 0. \quad (3.6)$$

По определению сила тока равна первой производной от заряда: $i = q'$, тогда $i' = (q')' = q''$.

Введем обозначение:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (3.7)$$

С учетом этих соотношений выражение (3.6) можно привести к виду:

$$q'' + \omega_0^2 q = 0. \quad (3.8)$$

Мы получили уже знакомое нам уравнение (2.3), только относительно заряда q . Его решением являются уравнения:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.9)$$

$$q = q_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.10)$$

Исходя из уравнений (3.9) и (3.10) можно заключить: *величина заряда на обкладках конденсатора колебательного контура изменяется с течением времени по закону синуса или косинуса.*

Таким образом, в идеальном колебательном контуре происходят гармонические колебания электрического заряда.

Из выражения (3.7) определим собственную циклическую частоту колебаний в колебательном контуре:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (3.11)$$

Собственная циклическая частота определяется параметрами колебательного контура — индуктивностью и емкостью.

Определим период колебаний: $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$.

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.12)$$

Формула (3.12) определяет период свободных колебаний в идеальном колебательном контуре и называется **формулой Томсона**. Как видно из нее, с увеличением индуктивности L и емкости C контура период колебаний увеличивается. Это объясняется следующим образом: чем больше индуктивность L , тем медленнее изменяется сила тока в контуре, чем больше емкость C , тем дольше перезаряжается конденсатор. Период электромагнитных колебаний в колебательном контуре очень малая величина (имеет значения порядка от тысячных до миллионных долей секунды). Соответственно частота колебаний достигает значения от нескольких тысяч до миллионов герц.

Запомните

Электромагнитные колебания в колебательном контуре являются высокочастотными.

Как мы уже знаем, аргумент косинуса (или синуса) в уравнениях (3.9) и (3.10) $\varphi = (\omega_0 t + \varphi_0)$ называется **фазой колебаний**. Она позволяет однозначно определять значение и модуль колеблющейся величины (заряда, смещения и т. д.) в данный момент времени. Фаза является угловой мерой времени, выраженной в долях периода. Если в начальный момент времени $t_0 = 0$ начальная фаза колебаний $\varphi_0 = 0$, то:

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \quad (3.13)$$

Колебательный контур является важнейшей частью любого радиопередатчика и радиоприемника. Он обычно применяется в качестве резонансной системы радиотехнического устройства. В высокочастотных генераторах колебательный контур служит источником электромагнитных колебаний. Электромагнитные колебания оптического диапазона находят широкое применение в радиосвязи, радиолокации и радионавигации.



1. Дайте определение электромагнитным колебаниям.
2. Из каких элементов состоит идеальный колебательный контур?
3. Какие электромагнитные колебания называются свободными?
4. Чему равна полная энергия электромагнитных колебаний в колебательном контуре?
- *5. Как распределена энергия электромагнитных колебаний между электростатическим полем конденсатора и магнитным полем катушки в идеальном колебательном контуре в моменты времени $T/4$; $T/2$; $3T/4$; T после начала разрядки конденсатора?
6. По какому закону изменяется заряд конденсатора колебательного контура с течением времени?
- *7. Объясните, как возникают электромагнитные колебания в колебательном контуре?
- *8. Какую роль играет явление самоиндукции в возникновении в колебательном контуре электромагнитных колебаний?
- *9. Почему в контуре, состоящем из конденсатора и резистора, не могут возникнуть электромагнитные колебания?
10. От каких физических величин зависит период свободных колебаний в идеальном колебательном контуре?
- *11. В колебательном контуре изменили начальное значение заряда конденсатора. Какие величины, характеризующие электромагнитные колебания в контуре, изменятся, а какие останутся прежними?
- *12. Зависит ли период свободных электромагнитных колебаний от энергии, запасенной в контуре в начальный момент времени? Ответ обоснуйте.



1. Пользуясь соотношениями $q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ и $i = q'$, получите зависимость силы тока в колебательном контуре от времени. Определите разность фаз колебаний заряда и силы тока. Начертите графики законов колебаний заряда и силы тока для значений начальной фазы: 1) $\varphi_0 = 0$; 2) $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$.
2. По указанию учителя разделитесь на группы по 4-5 человек. Вместе составьте три задачи на тему свободные электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре, обсудите условия составленных задач, корректность их условий и возможные пути решения. Поменяйтесь задачами с другой группой, решите их. Оцените эти задачи. Затем вынесите ваше решение на обсуждение (устно или письменно по указанию учителя).

Примеры решения задач

1. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 10^{-5}$ Ф и катушки индуктивностью $L = 0,2$ Гн. Конденсатор зарядили до напряжения $U_m = 2$ В и он начал разряжаться. Какой будет сила тока в контуре в тот момент, когда энергия магнитного поля катушки будет равна энергии электрического поля конденсатора? Сопротивление контура равно нулю.

Дано:

$C = 10^{-5} \text{ Ф}$

$L = 0,2 \text{ Гн}$

$U_m = 2 \text{ В}$

$W_s = W_x$

$i - ?$

Решение. В момент начала разрядки конденсатораполная энергия контура равна: $\frac{CU_m^2}{2}$.Так как $R = 0$, полная энергия электромагнитных колебаний сохраняется:

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{CU^2}{2} + \frac{Li^2}{2}.$$

В искомый момент времени по условию задачи $W_s = W_x$, следовательно:

$$\frac{CU^2}{2} = \frac{Li^2}{2},$$

Поэтому можно записать: $\frac{CU_m^2}{2} = 2 \frac{Li^2}{2}$, отсюда:

$$i = U_m \sqrt{\frac{C}{2L}} = 2 \text{ В} \cdot \sqrt{\frac{10^{-5} \text{ Ф}}{2 \cdot 0,2 \text{ Гн}}} = 0,01 \text{ А},$$

$$i = 0,01 \text{ А}.$$

2. Заряд на обкладках конденсатора идеального колебательного контура меняется по закону $q = 10^{-3} \cos 10^4 \pi t$ (Кл). Определите амплитуду, частоту и период свободных колебаний. Чему равна емкость конденсатора, если индуктивность катушки $L = 0,2$ Гн?

Дано:

$q = 10^{-3} \cos 10^4 \pi t \text{ (Кл)}$

$L = 0,2 \text{ Гн}$

$q_m - ? \quad T - ? \quad \nu - ?$

$C - ?$

Решение. Запишем уравнение гармонических колебаний заряда на обкладках конденсатора:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Сравнивая это уравнение с уравнением $q = 10^{-3} \cos 10^4 \pi t$, находим:1) амплитуду колебаний заряда: $q_m = 10^{-3}$ Кл;2) циклическую частоту: $\omega_0 = 10^4 \pi = 3,14 \cdot 10^4$ рад/с;3) частоту: $\nu = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{3,14 \cdot 10^4}{6,28} = 0,5 \cdot 10^4$ Гц = 5 кГц;4) период колебаний: $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{10^4 \pi} = 2 \cdot 10^{-4}$ с;5) емкость конденсатора определим из формулы $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L} = \frac{1}{9,86 \cdot 10^8 \cdot 0,2} \approx 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}.$$



Упражнение 3

1. Колебательный контур имеет индуктивность $L = 1,6$ мГн и емкость $C = 0,04$ мкФ, максимальное напряжение на конденсаторе $U_m = 200$ В. Определите максимальную силу тока в контуре, считая его идеальным.
Ответ: 1 А.
2. Полная энергия электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре 0,2 мДж, максимальное значение напряжения 100 В, амплитуда силы тока 1 А. Определите индуктивность и емкость контура.
Ответ: 0,4 мГн; 0,04 мкФ.
- *3. Воздушный конденсатор, состоящий из двух круглых пластин диаметром $D = 20$ см каждая, замкнут на катушку индуктивностью $L = 1$ мГн. Определите наибольшее значение напряжения на конденсаторе, если максимальная сила тока в контуре 0,1 А. Расстояние между пластинами конденсатора 1 см, сопротивлением проводов и катушки пренебречь.
Ответ: 600 В.
- *4. Катушка индуктивностью $L = 31$ мГн, активным сопротивлением $R = 0$ соединена с плоским конденсатором, площадь пластин которого $S = 20$ см² и расстояние между ними $d = 1$ см. Наибольшее значение силы тока в контуре $I_m = 0,2$ мА, а максимальное напряжение на обкладках конденсатора $U_m = 10$ В. Чему равна диэлектрическая проницаемость диэлектрика, которым заполнено пространство между обкладками конденсатора?
Ответ: $\epsilon = 7$.
- *5. Максимальное напряжение на обкладках конденсатора идеального колебательного контура $U_m = 30$ В, а максимальное значение силы тока в контуре $I_m = 1,4$ А. Определите напряжение и силу тока в контуре в тот момент, когда энергия магнитного поля катушки равна энергии электрического поля конденсатора.
Ответ: ≈ 1 А; 21,3 В.
- *6. Идеальный колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 0,2$ Гн и конденсатора емкостью $C = 10$ мкФ. В момент, когда напряжение на конденсаторе $U = 1$ В, сила тока в контуре $i = 0,01$ А. Найдите максимальную силу тока в контуре.
Ответ: $I_m \approx 0,012$ А.
- *7. Идеальный колебательный контур состоит из двух последовательно соединенных конденсаторов, емкости которых равны $C_1 = 4$ пФ и $C_2 = 8$ пФ и которые подключены к выводам катушки индуктивностью 0,4 мГн. Определите максимальное напряжение на обкладках конденсаторов, если максимальное значение силы тока в катушке 1 мА.
Ответ: 8,2 В; 4,1 В.
8. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 2,5$ мкФ и катушки индуктивностью $L = 1$ Гн. Амплитуда колебаний заряда на обкладках конденсатора 0,5 мкКл. Напишите уравнение колебаний заряда.
Ответ: $q = 0,5 \cdot 10^{-6} \cos 630 t$.

9. Определите период собственных колебаний колебательного контура, состоящего из катушки индуктивностью $L = 0,1$ Гн и конденсатора емкостью $C = 2$ мкФ.

Ответ: $2,8 \cdot 10^{-3}$ с.

10. Частота свободных колебаний колебательного контура, содержащего катушку индуктивностью $L = 0,04$ Гн, равна $\nu = 800$ Гц. Какова емкость конденсатора этого контура?

Ответ: 1 мкФ

- *11. Заряд на обкладках конденсатора меняется по закону $q = 0,03 \cos 10^5 \pi t$ (Кл). Определите значение заряда на обкладках конденсатора в момент времени $t = T/8$.

Ответ: 0,02 Кл.

- *12. Определите частоту собственных колебаний идеального контура, если максимальное напряжение на обкладках его конденсатора емкостью $C = 0,5$ мкФ равно $U_m = 100$ В, а максимальное значение силы тока в контуре $I_m = 50$ мА.

Ответ: 160 Гц

- *13. В идеальном колебательном контуре с частотой собственных колебаний $\nu_1 = 20$ кГц при замене конденсатора на другой частота стала равна $\nu_2 = 30$ кГц. Какой будет частота собственных колебаний контура, если соединить эти два конденсатора параллельно?

Ответ: 16,6 кГц.

- *14. Три одинаково заряженных конденсатора емкостью C каждый соединяют в батарею и подключают к катушке индуктивностью L . Во сколько раз будут отличаться периоды свободных колебаний контура, если один раз конденсаторы соединить параллельно, второй раз — последовательно? Сопротивлением контура R пренебречь.

Ответ: в 3 раза.

- *15. Заряженный конденсатор емкостью $C = 0,5$ мкФ подключили к катушке индуктивностью $L = 5,0$ мГн. Через какое время с момента подключения катушки энергия электрического поля конденсатора станет равной энергии магнитного поля катушки?

Ответ: $3,9 \cdot 10^{-5}$ с.

§ 4. Вынужденные электромагнитные колебания. Автоколебания



Ключевые понятия:

- ✓ затухающие колебания
- ✓ вынужденные колебания
- ✓ вынуждающая сила
- ✓ резонанс
- ✓ автоколебания
- ✓ высокочастотный генератор

На этом уроке вы:

- изучите условия возникновения вынужденных колебаний;
- познакомитесь с понятием автоколебаний;
- рассмотрите принцип работы высокочастотного генератора.



Затухающие колебания. До сих пор мы рассматривали свободные электромагнитные колебания, возникающие в *идеальной колебательной контуре*, электрическое сопротивление которого равно нулю. Такие идеальные колебания происходят по синусоидальному закону с постоянной амплитудой и могут происходить сколь угодно долго. На самом деле, все реальные колебательные контуры содержат электрическое сопротивление R , вследствие этого часть энергии электромагнитных колебаний в течение каждого периода расходуется на нагревание элементов контура, и превращается в тепловую энергию. Убыль энергии колебаний означает и уменьшение амплитуды колебаний. Когда израсходуется вся энергия, запасенная в колебательном контуре, колебания прекратятся. Поэтому амплитуда *затухающих колебаний* уменьшается, пока не станет равной нулю. *Колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени вследствие потери энергии колебательной системой, называются затухающими колебаниями* (рис. 4.1). Затухающие колебания, строго говоря, не подчиняются гармоническому

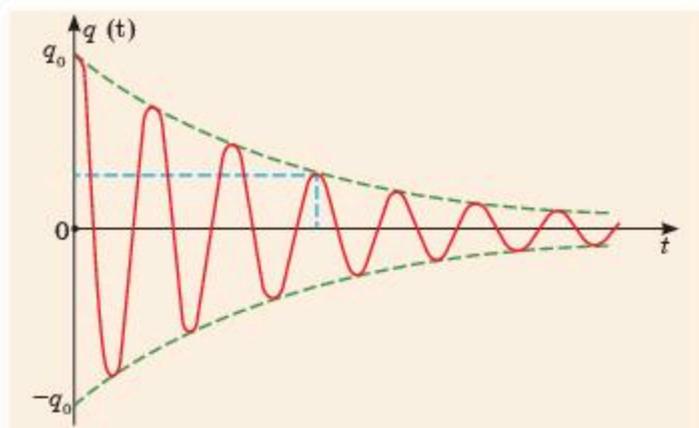


Рис. 4.1. Затухающие колебания заряда в реальном колебательном контуре

закону. Амплитуда колебаний уменьшается по экспоненциальному закону.

Вынужденные колебания. Чтобы колебания не затухали, необходимо постоянно восполнять потери энергии колебаний путем воздействия на колебательную систему какого-нибудь внешнего периодического источника энергии. В случае механических колебаний это может быть периодическая внешняя сила, которая называется вынуждающей силой. В случае электромагнитных колебаний такой внешней силой является периодически изменяющееся переменное напряжение (ЭДС источника тока). Вынужденные колебания — это незатухающие колебания.

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего источника. Примером вынужденных колебаний является переменный электрический ток, который возникает под действием переменного напряжения, вырабатываемого генераторами. Законы переменного тока мы подробно рассмотрим в следующей главе.

В начале действия внешнего периодического воздействия наблюдаются достаточно сложные колебания. Но спустя некоторое время после начала действия внешнего воздействия, колебания приобретают стационарный характер и не зависят от начальных условий. Таким образом, при вынужденных колебаниях система полностью “забывает” свое начальное состояние.

Запомните

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы. В случае электромагнитных колебаний это — частота изменения ЭДС источника тока.

Амплитуда колебаний и энергия, передаваемая системе за период вынужденных колебаний, зависят от того, насколько различаются частота ω вынуждающей силы и частота ω_0 собственных колебаний, а также от величины электрического сопротивления колебательного контура.

Это вы знаете

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты собственных колебаний с частотой колебаний вынуждающей силы называется резонансом.



Рис. 4.2. Основные элементы автоколебательной системы

При резонансе создаются оптимальные условия для передачи энергии от внешнего источника в систему, так как в течение всего периода работа внешней силы источника над системой положительна.

Автоколебания. Есть еще один способ получения незатухающих колебаний, это — *автоколебания*, которые принципиально отличаются от вынужденных колебаний. *Автоколебаниями* называются незатухающие колебания, существующие без периодического внешнего воздействия. Источник энергии содержится в самой колебательной системе и поступление энергии, компенсирующей потери, регулируется самой системой. Частота и амплитуда автоколебаний определяются конструкцией колебательной системы. В состав любой автоколебательной системы входят: источник энергии, колебательная система с затуханием, клапан, открывающий и закрывающий доступ энергии от источника к колебательной части в такт с ее колебаниями, управляемый автоматически самой колебательной частью (рис. 4.2).

В автоколебательной системе амплитуда и частота колебаний определяются свойствами самой системы, тогда как при вынужденных колебаниях они зависят от параметров внешнего вынуждающего воздействия.

Примером электрических автоколебаний является *генератор на транзисторе* (рис. 4.3). Он содержит колебательный контур, источник энергии и транзистор.



Рис. 4.3. Генератор на транзисторе

Это вы знаете

Транзистор — это полупроводниковый триод, состоящий из трех полупроводников различной проводимости: эмиттера, базы и коллектора. Транзисторы могут быть типа *p-n-p* или типа *n-p-n*. Эмиттер и коллектор имеют одинаковые основные носители заряда (например, дырки), а база имеет основные носители заряда противоположного знака (например, электроны).

Транзистор выполняет роль клапана (ключа), который подключает источник энергии в такт колебаниям. Генератор на транзисторе вырабатывает колебания высокой частоты (*мегагерцы*), поэтому ключ должен обладать огромным быстродействием, быть практически безынерционным. Транзистор как раз отвечает этому требованию.

Перейдем к работе генератора. Для того чтобы компенсировать потери энергии в колебательном контуре, к нему подключают источник постоянного напряжения. Но если он будет подключен к контуру постоянно, то половину периода он подзаряжает конденсатор (когда присоединенная к положительному полюсу источника пластина конденсатора заряжена положительно), а вторую половину периода, когда заряд на обкладках конденсатора меняет знак, конденсатор, наоборот, разряжается через источник. Другими словами, первую половину периода энергия поступает в контур, а вторую — возвращается в источник. При таком подключении источник не может восполнять потери энергии. Если источник будет подключаться к колебательному контуру периодически только в те моменты, когда присоединенная к положительному полюсу источника пластинка конденсатора заряжена положительно, то конденсатор все время будет подзаряжаться и колебания не будут затухать. Чтобы так управлять ключом (транзистором), используется так называемая *обратная связь*, которая осуществляется с помощью катушки индуктивности. Чтобы понять принцип работы генератора, рассмотрим его схему (рис. 4.4).

Источник постоянного напряжения подключается к колебательному контуру через транзистор. Пусть базой транзистора *Б* служит полупроводник *n*-типа, а коллектором *К* и эмиттером *Э* — полупроводники *p*-типа. Так как на эмиттер подается положительный потенциал, а на коллектор — отрицательный, переход эмиттер — база является прямым, а переход база — коллектор — обратным (см. *p-n* переход, 10 класс), и через него ток в цепи не течет. Чтобы замкнуть цепь, базе нужно сообщить отрицательный (относитель-

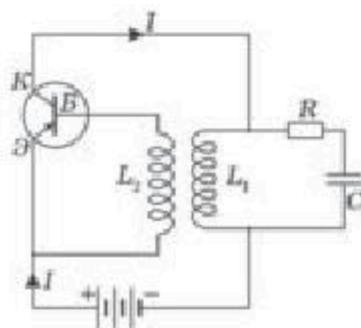


Рис. 4.4. Схема транзисторного генератора

но эмиттера) потенциал, а чтобы при этом конденсатор подзаряжался, верхняя его пластинка должна быть заряжена положительно. В те моменты времени, когда верхняя пластинка заряжена отрицательно, ток в цепи должен отсутствовать, для этого база должна иметь положительный относительно эмиттера потенциал. Итак, чтобы восполнять потери энергии в колебательном контуре и подзаряжать конденсатор в нужные моменты времени, напряжение на эмиттерном переходе должно периодически менять знак в строгом согласовании с колебаниями напряжения в контуре. Вот для этого и нужна вышеупомянутая обратная связь. Как показано на рисунке 4.4, катушка индуктивности L_2 подключена к эмиттерному переходу. Эта катушка индуктивно связана с катушкой индуктивности L_1 колебательного контура. Благодаря явлению электромагнитной индукции, колебания магнитного поля катушки L_1 создают колебания напряжения на концах катушки L_2 , а значит, возникают колебания напряжения на эмиттерном переходе. Чтобы подключения происходили в нужные моменты времени, необходимо правильно подобрать фазу колебаний напряжения на эмиттерном переходе.

Амплитуда колебаний в контуре возрастает до тех пор, пока потери энергии в контуре не станут точно компенсироваться поступлением энергии от источника. В результате устанавливается режим стационарных незатухающих колебаний. Частота колебаний определяется следующей формулой: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Автоколебания имеют очень широкий спектр частот и применяются в различных областях, например, в радиотехнике, радиосвязи, на телевидении, в ЭВМ и т. д.

Электромагнитные колебания могут оказывать как положительное, так и вредное воздействие на живые организмы. Оказывается, любой орган человека имеет свою резонансную частоту. При совпадении частоты внешнего пульсирующего воздействия с резонансной частотой возникают *биения*, результат такого воздействия зависит от амплитуды колебаний. Известно, например, что электромагнитное излучение способно влиять на психику человека.



1. Объясните, почему свободные колебания в реальном колебательном контуре затухают?
2. Какие колебания называются вынужденными?
3. От чего зависит частота и амплитуда вынужденных колебаний?
4. Чем отличаются автоколебания от вынужденных?
5. Из каких основных элементов состоит автоколебательная система?
6. Какую роль играет транзистор в работе генератора?
7. Что такое обратная связь?
8. Объясните принцип работы высокочастотного генератора.
9. Приведите примеры автоколебаний.



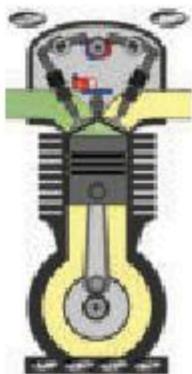
1. Вынужденные колебания под внешним воздействием могут совершать даже тела, которые не являются колебательными системами. Рассмотрите картинки (рис. 4.5) и расскажите, какие вынужденные колебания в них происходят. Назовите вынуждающую силу в каждом случае. Приведите еще несколько примеров вынужденных колебаний.



а)



б)



а)



в)

Рис. 4.5. Примеры вынужденных колебаний

2. По указанию учителя разделитесь на несколько групп. Соберите материал о влиянии электромагнитного излучения на живые организмы. Подготовьте презентацию и вынесите ее на обсуждение.

§ 5. Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями



Ключевые понятия:

- ✓ аналогия
- ✓ координата
- ✓ заряд
- ✓ скорость
- ✓ сила тока
- ✓ пружинный маятник
- ✓ колебательный контур
- ✓ конденсатор
- ✓ катушка

На этом уроке вы:

- будете сравнивать и проводить аналогии между основными характеристиками механических и электромагнитных колебаний.



Это вы знаете

Физическая природа механических и электромагнитных колебаний разная, но законы изменения колеблющихся физических величин с течением времени одинаковы, они могут быть описаны одинаковыми уравнениями. Колебательные движения различной природы характеризуются одними и теми же параметрами.

Проведем аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями. Мы рассмотрели колебания математического и пружинного маятников, когда происходят периодические изменения координаты грузика x и его скорости v , а также возникновение электромагнитных колебаний в колебательном контуре, когда происходят периодические изменения величины заряда q на обкладках конденсатора и силы тока i в контуре.

В двух приведенных случаях физическая природа колеблющихся величин разная, но их изменения происходят по одинаковым законам. Уравнения колебаний разной природы пишутся одинаково. Нам известно, что для того чтобы в системе возникли колебания, ей необходимо сообщить энергию извне. Например, растягивая пружину пружинного маятника, мы сообщаем системе дополнительную потенциальную энергию. Если теперь предоставить маятник самому себе, то упругая сила будет возвращать его в положение равновесия ($x = 0$), т. е. в то положение, в котором смещение грузика равно нулю, а значит, и потенциальная энергия маятника будет равна нулю:

$$E_p = \frac{kx^2}{2} = 0.$$

В этом положении полная энергия пружинного маятника равна его кинетической энергии: $E = E_k = \frac{mv_m^2}{2}$.

В колебательном контуре избыток энергии легче сообщить, зарядив конденсатор. В тот момент, когда конденсатор разрядится ($q = 0$),

энергия электрического поля тоже будет равна нулю: $W_s = \frac{q^2}{2C} = 0$, а энергия магнитного поля в катушке достигнет максимума: $W_x = \frac{LI_m^2}{2}$ и будет равна полной энергии колебательного контура.

Отклонение грузика от положения равновесия пружинного маятника аналогично зарядке конденсатора колебательного контура. При этом пружинному маятнику сообщается потенциальная энергия $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$, а конденсатору $W_s = \frac{q_m^2}{2C}$ (рис. 5.1, а). Эти две формулы имеют одинаковый вид: роль жесткости пружины k в механических колебаниях играет коэффициент $\frac{1}{C}$ в электромагнитных колебаниях, а роль координаты x_m — заряд q_m .

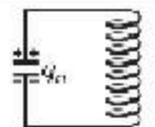
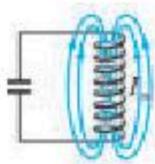
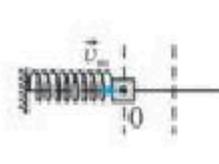
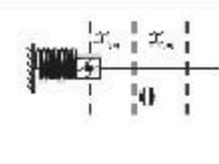
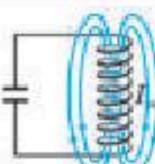
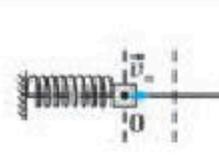
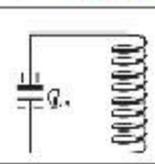
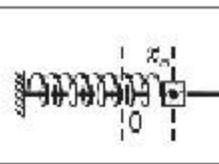
№	Электромагнитные колебания	Механические колебания
а)	 $t = 0$ $W_s = \frac{q_m^2}{2C}$ $W_x = 0$	 $t = 0$ $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$ $E_k = 0$
б)	 $t = \frac{1}{4} T$ $W_s = 0$ $W_x = \frac{LI_m^2}{2}$	 $t = \frac{1}{4} T$ $E_k = \frac{mv_m^2}{2}$ $E_p = 0$
в)	 $t = \frac{1}{2} T$ $W_s = \frac{q_m^2}{2C}$ $W_x = 0$	 $t = \frac{1}{2} T$ $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$ $E_k = 0$
г)	 $t = \frac{3}{4} T$ $W_s = 0$ $W_x = \frac{LI_m^2}{2}$	 $t = \frac{3}{4} T$ $E_k = \frac{kx_m^2}{2}$ $E_p = 0$
д)	 $t = T$ $W_s = \frac{q_m^2}{2C}$ $W_x = 0$	 $t = T$ $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$ $E_k = 0$

Рис. 5.1. Аналогии между электромагнитными и механическими колебаниями

В крайнем правом положении величина возвращающей силы максимальна, следовательно, максимально и ускорение грузика. По мере приближения грузика к положению равновесия, ускорение и возвра-

щающая сила уменьшаются, а скорость грузика возрастает. Грузик, придя в положение равновесия, не останавливается, а продолжает свое движение, так как он обладает скоростью.

В колебательном контуре в момент начала разрядки конденсатора заряд и разность потенциалов на обкладках конденсатора максимальны, а сила тока в катушке равна нулю. По мере разрядки конденсатора возрастает сила тока в цепи, что приводит к возникновению тока самоиндукции, который будет препятствовать росту тока, вызванного разрядкой конденсатора (это следует из правила Ленца). Но ток в цепи все равно нарастает, так как все больший заряд стекает с обкладок конденсатора.

Моменту времени $t = \frac{1}{4}T$, когда груз проходит через положение равновесия $x = 0$, $v = v_m$, соответствует полная разрядка конденсатора $q = 0$ и максимальное значение силы тока в катушке $i = I_m$ (рис. 5.1, б). При этом потенциальная энергия маятника $E_p = 0$, а кинетическая энергия принимает максимальное значение $E_k = \frac{mv_m^2}{2}$.

В колебательном контуре этому моменту соответствуют равенство нулю энергии электрического поля $W_s = 0$ и максимальное значение энергии магнитного поля $W_x = \frac{LI_m^2}{2}$. Сравнение двух последних формул позволяет провести аналогию между массой m в механических колебаниях и индуктивностью L в электромагнитных колебаниях, а скорость грузика v аналогична силе тока i .

Далее грузик маятника, перемещаясь влево, будет сжимать пружину. В колебательном контуре этому моменту соответствует следующее: ток в катушке начнет убывать, что, согласно правилу Ленца, порождает ток самоиндукции, который будет течь в том же направлении, т. е. именно из-за явления самоиндукции будет происходить дальнейшее движение заряженных частиц в прежнем направлении, что приводит к переразрядке конденсатора. К моменту времени $t = \frac{1}{2}T$ грузик достигнет крайнего левого положения, скорость его станет равной нулю, а конденсатор полностью перезарядится, как показано на рисунке 5.1, в. Сила тока в контуре в этот момент равна нулю.

Далее грузик начинает перемещаться вправо под действием возвращающей силы, роль которой выполняет сила упругости пружины; в контуре конденсатор будет разряжаться за счет разности потенциалов между его обкладками. В момент времени $t = \frac{3}{4}T$ грузик снова будет проходить через положение равновесия с максимальной скоростью, а конденсатор полностью разрядится, и сила тока в контуре достигнет максимального значения (рис. 5.1, г). И наконец, через один полный период, когда $t = T$, обе системы придут в исходное положение (рис. 5.1, д).

Итак, мы убедились, что *колебания в двух рассмотренных системах (пружинный маятник и колебательный контур) происходят по одинаковым*

законам, хотя причина их возникновения различна по физической природе. В данном случае речь идет не о том, какая именно величина изменяется, а как она изменяется со временем, какие колебания она совершает, другими словами, по каким закономерностям происходят эти колебания.

Приведенное нами сравнение электромагнитных и механических колебаний не только помогает глубже проникнуть в суть вопроса, но и имеет определенную практическую ценность. Поскольку процессы в механических колебательных системах легче представить, часто, используя аналогию между механическими и электрическими величинами, заменяют данную электрическую колебательную систему соответствующей ей механической колебательной системой, что упрощает изучение процессов, происходящих в ней. Теперь оформим в виде таблицы аналогичные величины, характеризующие механические и электрические колебания (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Характеристики колебаний

Механические колебания	Электромагнитные колебания
Координата x	Заряд q
Амплитуда x_m	Максимальный заряд q_m
Скорость: $v = x'$	Сила тока: $i = q'$
Ускорение: $a = v' = x''$	Скорость изменения силы тока: $i' = q''$
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Обратная величина емкости $\frac{1}{C}$
Сила F	Напряжение U
Потенциальная энергия деформированной пружины: $E_p = \frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля конденсатора: $W_s = \frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия груза: $E_k = \frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля катушки: $W_m = \frac{Li^2}{2}$



1. Изменению какой величины в колебательном контуре соответствует увеличение коэффициента жесткости пружинного маятника?
2. Изменению какой величины в пружинном маятнике соответствует уменьшение индуктивности в колебательном контуре?
3. Напишите уравнение механических колебаний пружинного маятника аналогично уравнению электромагнитных колебаний в колебательном контуре.
4. Объясните, почему электрический ток в колебательном контуре не исчезает сразу, когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю. Какой процесс этому соответствует в пружинном маятнике?
5. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью L и двух параллельно соединенных конденсаторов емкостью C_1 и C_2 . Начертите аналогичную схему, состоящую из пружинных маятников.



Опираясь на материалы данного параграфа, проведите аналогию между колебаниями математического маятника и электромагнитными колебаниями в колебательном контуре, начертите в тетради и заполните таблицу, аналогичную таблице 5.1

§ 6. Графические зависимости заряда и силы тока от времени в идеальном колебательном контуре



Ключевые понятия:

- ✓ графики колебаний заряда
- ✓ графики колебаний силы тока
- ✓ сдвиг фаз
- ✓ компьютерное моделирование
- ✓ векторные диаграммы
- ✓ вращение вектора

На этом уроке вы:

- рассмотрите графические способы изучения электромагнитных колебаний;
- познакомитесь с компьютерным моделированием колебательных процессов и методом векторных диаграмм.



Графики колебаний заряда и силы тока в идеальном колебательном контуре. Графический способ описания гармонических колебаний позволяет наглядно представить временную зависимость колеблющихся величин, а также, если известен масштаб, определить основные характеристики колебаний. Сначала построим график колебаний заряда в идеальном колебательном контуре, для этого воспользуемся уравнением (3.9), приняв начальную фазу колебаний ($\varphi_0 = 0$) равной нулю:

$$q = q_m \cos \omega_0 t \quad (6.1)$$

График этого уравнения представлен на рисунке 6.1, *а*. На графике по оси ординат отложены значения заряда на обкладках конденсатора, по оси абсцисс — снизу время в долях периода, сверху — соответствующие значения фазы колебаний.

Чтобы найти уравнение колебаний силы тока, возьмем первую производную от уравнения заряда (6.1) по времени:

$$i = q' = -q_m \omega_0 \sin \omega_0 t, \text{ или, обозначив } q_m \omega_0 = I_m, \text{ имеем: } i = -I_m \sin \omega_0 t, \text{ или}$$

$$i = I_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (6.2)$$

Сравнивая уравнения (6.1) и (6.2), можно увидеть, что колебания заряда и силы тока в идеальном колебательном контуре происходят со сдвигом фаз, равным $\pi/2$. С учетом этого, построим график зависимости силы тока от времени (рис. 6.1, *б*).

Из представленных на рисунке 6.1 графиков, при известном масштабе, можно определить период колебаний, а значит, и частоту по оси абсцисс, амплитуду и мгновенное значение колеблющейся величины по оси ординат. Наглядно видны и сдвиги фаз. В те моменты, когда заряд на обкладках конденсатора максимален, сила тока в цепи равна нулю.

Компьютерное моделирование графических зависимостей заряда и силы тока от времени. Чтобы исследовать выше рассмотренные

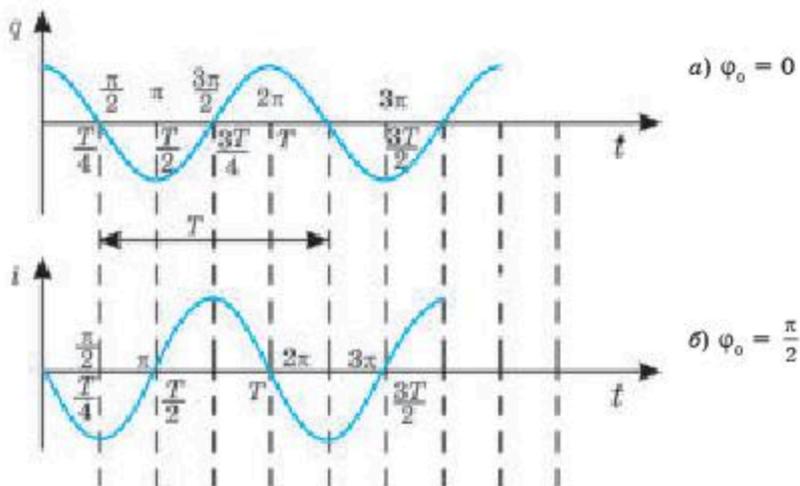


Рис. 6.1. Графики зависимости
а) заряда и б) силы тока от времени в идеальном
колебательном контуре при $\varphi_0 = 0$, $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$

графики посредством компьютерного моделирования, воспользуемся моделью колебательного контура, представленного на CD-диске курса “Открытая физика”, версии 1.1; фирмы 1С.

Для начала работы необходимо:

- 1) запустить программу “Открытая физика”;
- 2) выбрать в содержании раздел “Электричество и магнетизм”; в данном разделе выбрать подраздел “Свободные колебания в RLC контуре”;
- 3) все опыты по моделированию процессов в колебательном контуре проводить в открывшемся окне “Свободные колебания в RLC контуре”;
- 4) все опытные установки выполняются в режиме “Выбор” (надо просто нажать данную кнопку и установить значения параметров L , C , R , Q_0 , необходимые для опытов, или, сдвигая линейку относительно указателя, расположенного над ней, или, щелкая мышкой по соответствующим кнопкам со стрелками, или, смещая бегунок на линейке относительно указателя).

Этапы работы:

1. Изменим параметры колебательного контура так, чтобы колебательный процесс был незатухающий, для этого установим сопротивление $R = 0$.

2. Установим начальные параметры системы:

- а) заряд конденсатора — $2,0 \cdot 10^{-6}$ Кл;
- б) емкость конденсатора — 2 мкФ;
- в) индуктивность катушки — 8 мГн (рис. 6.2).

Получим график изменения заряда с течением времени, для этого поставим галочку напротив пункта Граф. $Q(t)$.

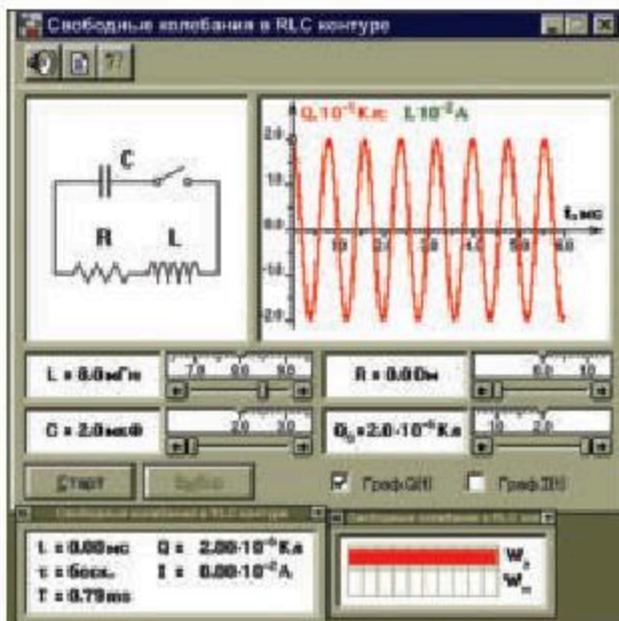


Рис. 6.2. Компьютерное моделирование электромагнитных колебаний

Получим график изменения силы тока с течением времени, для этого поставим галочку напротив пункта Граф. $I(t)$, а галочку напротив $Q(t)$ — сбросим.

Метод векторных диаграмм. Для наглядного изображения гармонических колебаний используют так называемые *векторные диаграммы*. Пусть гармонические колебания некоторой физической величины происходят по закону:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (6.3)$$

Проведем две взаимно перпендикулярные оси — горизонтальную и вертикальную (рис. 6.3). Отложим от точки O в каком-нибудь выбранном масштабе амплитуду колебаний A в виде вектора под углом $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ к горизонтальной оси.

Пусть вектор \vec{A} равномерно вращается против хода часовой стрелки с угловой скоростью ω_0 вокруг оси O , перпендикулярной плоскости рисунка. Тогда угол φ будет линейно увеличиваться со временем.

Проекция вектора \vec{A} на горизонтальную ось равна:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Это уравнение определяет значение колеблющейся величины x в данный момент времени: в механических колебаниях — это смещение, в электромагнитных — величина заряда.

Найдем первую производную от x по времени в выражении (6.3):

$$x' = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right).$$

Первая производная от какой-либо физической величины по времени равна скорости изменения этой величины (в пружинном маятнике это скорость перемещения груза, в колебательном контуре — скорость изменения заряда, равная силе тока $i = q'$). Мы получили уравнение гармонического колебания скорости:

$$x' = -A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (6.4)$$

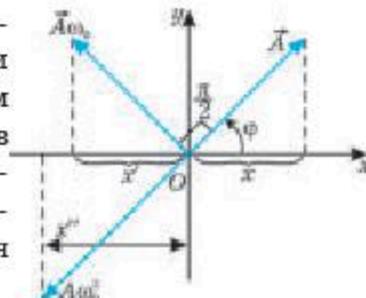


Рис. 6.3. Метод векторных диаграмм

Амплитуда этого колебания равна $A\omega_0$. Отложим ее в виде вектора на векторной диаграмме под углом $\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$ к горизонтальной оси.

Угол между векторами \vec{A} и $\vec{A}\omega_0$ будет равен $\frac{\pi}{2}$. Проекция вектора $\vec{A}\omega_0$ на горизонтальную ось будет равна скорости (силе тока) в данный момент времени (рис. 6.3).

Сравнивая уравнения (6.3) и (6.4), можно увидеть, что разность фаз этих колебаний равна $\frac{\pi}{2}$.

Вторая производная x'' равна ускорению в механических колебаниях и скорости изменения силы тока в электромагнитных колебаниях:

$$x'' = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

или

$$x'' = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi). \quad (6.5)$$

Отложим амплитуду $A\omega_0^2$ также в виде вектора на векторной диаграмме. Угол между векторами \vec{A} и $\vec{A}\omega_0^2$ равен π , чему соответствует разность фаз колебаний (формулы 6.3, 6.5).

Все отложенные амплитуды вращаются против хода часовой стрелки с угловой скоростью ω_0 , углы между ними остаются неизменными, и равными разности фаз между соответствующими колебаниями. Таким образом, с помощью векторной диаграммы можно наглядно увидеть соотношение между величинами, характеризующими колебательное движение в данный момент времени и фазовые соотношения между ними.

Например, из диаграммы легко видеть, что если смещение x и ускорение x'' равны нулю (векторы \vec{A} и $\vec{A}\omega_0^2$ направлены вдоль вертикальной оси), то скорость максимальна (положение равновесия). Когда скорость равна нулю, смещение и ускорение имеют максимальные значения.

Фазу колебаний наглядно можно изобразить только в векторной диаграмме, в чем и заключается ценность данного способа.

Фаза колебаний — это угловая мера времени, выраженного в долях периода: $\varphi = 2\pi \frac{t}{T}$

Теперь вернемся к нашему утверждению, что гармонические колебания происходят по закону синуса или косинуса. В уравнениях (1.2); (3.9) и (6.3) мы использовали косинус. Как же написать эти уравнения через синус и что тогда изменится? Нам известно соотношение

$$\cos\varphi = \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Тогда уравнение (3.9) можно записать:

$$q = q_m \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \varphi_0\right).$$

Видно, что начальная фаза при этом равна $\left(\varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$.

В самом деле, если мы за начальный момент примем момент полной зарядки конденсатора, то удобнее пользоваться формулой (3.9), и тогда при $t = 0$ начальная фаза $\varphi_0 = 0$, заряд на обкладках конденсатора $q = q_m$. Если за начало колебаний принять момент полной разрядки конденсатора (ток в контуре максимален), то удобнее использовать функцию синус; в начальный момент времени $\varphi_0 = 0$ и уравнение колебаний заряда можно записать в виде:

$$q = q_m \sin\omega_0 t.$$

В общем случае φ_0 может отличаться от нуля. При решении конкретных задач надо выяснить, чему равна начальная фаза, каковы начальные условия и какой функцией (синус или косинус) удобнее пользоваться в данном конкретном случае.



1. Какие параметры колебаний заряда и силы тока необходимо знать для построения графиков колебаний этих величин?
2. Чему равна разность фаз колебаний заряда и силы тока?
3. Расскажите, какую предварительную работу нужно провести для компьютерного моделирования графических зависимостей заряда и силы тока в идеальном колебательном контуре?
4. Какие начальные параметры системы нужно задать для получения исследуемых графиков на компьютере?
5. Какие параметры колебаний заряда и силы тока можно определить по полученным графикам?
6. Как определить начальную фазу колебаний методом векторных диаграмм?
7. Как определить разность фаз двух колебаний, изображенных в одной векторной диаграмме?
8. Можно ли определить по векторной диаграмме фазу колебаний в данный момент времени?
9. В чем заключается суть метода векторных диаграмм?



1. Постройте графики $q = q(t)$ и $i = i(t)$ для идеального колебательного контура, если амплитудное значение заряда равно 0,05 Кл, период колебаний заряда равен 0,02с, начальная фаза колебаний заряда $\varphi_0 = \pi/4$.
2. Постройте векторную диаграмму для свободных колебаний заряда и силы тока в идеальном колебательном контуре, начальная фаза колебаний заряда: 1) $\varphi_0 = 0$; 2) $\varphi_0 = \frac{\pi}{3}$.

Самое важное в главе 2

• Уравнение гармонических колебаний заряда в колебательном контуре имеет вид:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где:

q_m — максимальное значение заряда на обкладках конденсатора, называется *амплитудой колебаний*;

$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ — *фаза колебаний*;

φ_0 — начальная фаза колебаний;

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ — *собственная циклическая частота колебаний*;

$T = 2\pi\sqrt{LC}$ — *период колебаний в контуре*.

• *Между электромагнитными и механическими колебаниями существует аналогия.*

• *Свободные колебания в реальной колебательной системе затухают. Для того, чтобы получить незатухающие колебания, необходимо восполнять потери энергии колебаний. Есть два способа получения незатухающих колебаний. Первый: потери энергии восполняются периодически от внешнего источника. Колебания, возникающие при этом, называются *вынужденными*. Второй: источник энергии содержится в самой колебательной системе, и поступление энергии регулируется самой системой. Такие незатухающие колебания называются *автоколебаниями*.*

Глава 3. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§7. Генератор переменного тока



Ключевые понятия:

- ✓ генератор переменного тока
- ✓ явление электромагнитной индукции
- ✓ магнитный поток
- ✓ индуктор
- ✓ якорь
- ✓ ротор
- ✓ статор

На этом уроке вы:

- познакомитесь с принципом работы и устройством генератора переменного тока.



Рис. 7.1. Генераторы на ГЭС

Генератор переменного тока. Генератором тока называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили *электромеханические индукционные генераторы переменного тока* (рис. 7.1)

Преимуществом таких генераторов является простота их устройства и возможность получения больших токов при достаточно высоком напряжении. В них механическая энергия превращается в электрическую.

Принцип работы генератора переменного тока.**Это вы знаете**

Возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур, называется явлением *электромагнитной индукции*.

Магнитным потоком Φ через площадь S контура называют величину

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha,$$

где B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между вектором \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура.

При этом, ЭДС индукции, возникающая в замкнутом проводящем контуре, равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Пусть в однородном постоянном магнитном поле с индукцией \vec{B} вращается с постоянной угловой скоростью ω проволочная рамка площадью S (рис. 7.2).

Так как рамка вращается с угловой скоростью ω , угол α между вектором \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура равен: $\alpha = \omega \cdot t$, тогда $\Phi = BS\cos\omega t$; т. е. поток магнитной индукции меняется по гармоническому закону. В рамке индуцируется ЭДС, равная $\mathcal{E} = -\frac{\Delta(BS\cos\omega t)}{\Delta t}$. Если взять очень малый промежуток времени, то при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta(BS\cos\omega t)}{\Delta t} \right) = -(BS\cos\omega t)' = BS\omega\sin\omega t.$$

Обозначим $\mathcal{E}_m = BS\omega$, тогда:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin\omega t. \quad (7.1)$$

Таким образом, в рамке, равномерно вращающейся в магнитном поле, наводится синусоидальная ЭДС индукции, следовательно, по рамке течет синусоидальный переменный ток. Чтобы можно было использовать этот ток, рамку разрезают, выводят ее концы на два изолированных кольца. К кольцам прижимают щетки, к которым присоединяют контакты внешней цепи (рис. 7.2). В таком случае на внешнюю нагрузку подается переменное напряжение, которое меняется по закону:

$$u = U_m \sin\omega t \text{ или } u = U_m \cos\omega t. \quad (7.2)$$

Какую из двух формул выбрать, зависит от выбора начала отсчета времени, о чем мы говорили в предыдущей главе. При этом изменения силы тока происходят с той же частотой, что и изменение напряжения, однако, в общем случае фазы колебаний напряжения и силы тока могут быть различными.

Устройство генератора переменного тока. Основными частями всякого индукционного генератора являются:

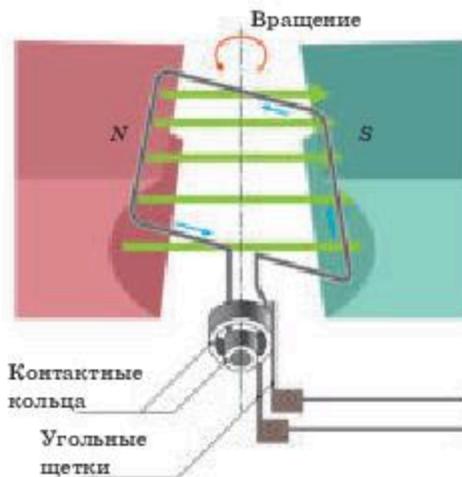


Рис. 7.2. Принципиальная схема генератора переменного тока

1. Индуктор — устройство, создающее магнитное поле. Это может быть либо постоянный магнит, либо электромагнит.

2. Якорь — обмотка, в которой индуцируется ЭДС.

3. Кольца со щетками — устройство, которым снимают с вращающихся частей индукционный ток или подают ток питания электромагнитам.

ЭДС, индуцируемая в последовательно соединенных витках, будет складываться из суммы ЭДС в каждом из них, поэтому обмотка якоря состоит из множества витков.

Мы знаем, что амплитуда ЭДС, наводимой в рамке $\mathcal{E}_m = BS\omega = \Phi\omega$ пропорциональна магнитному потоку через рамку. Для увеличения магнитного потока в индукционных генераторах применяют специальную магнитную систему. Она состоит из двух сердечников, изготовленных из электротехнической стали. В пазах одного из двух сердечников размещаются обмотки, создающие магнитное поле (постоянный магнит или электромагнит), в пазах второго сердечника — обмотки, в которых индуцируется ЭДС (якорь). Один из сердечников, который вращается вместе со своей обмоткой, называется *ротором*, второй, неподвижный, сердечник называется *статором*. На рисунке 7.3, б вращается проводочная рамка (якорь), а электромагнит остается неподвижным (является статором). В промышленных генераторах вращается электромагнит, т. е. он является ротором, а якорь, где индуцируется ЭДС, остается неподвижным (рис. 7.3, а). Такая конструкция более целесообразна, так как сила тока, питающего электромагнит, гораздо меньше силы тока, индуцируемой в обмотках якоря. А ток большой мощности удобнее снимать с неподвижных обмоток.

Слабый ток к индуктору подается с помощью коллектора. Он вырабатывается отдельным генератором постоянного тока. Обмотку статора, в которой индуцируется вырабатываемый генератором ток, соединяют неподвижными шинами с линией, по которой передают электроэнергию.

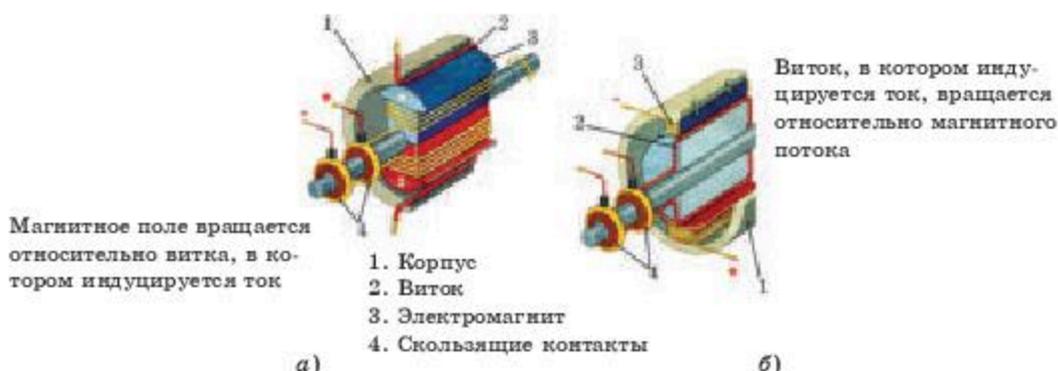


Рис. 7.3 Модель генератора переменного тока

Рассмотренный генератор называется *однофазным*. Однофазные генераторы в эксплуатации неэкономичны, поэтому для выработки электроэнергии обычно используют трехфазные генераторы.

На современных гидроэлектростанциях падающая вода вращает вал электрогенератора с частотой 1—2 оборота в секунду. Если бы якорь генератора имел только одну обмотку, он вырабатывал бы переменный ток частотой (1—2 Гц). Но частота промышленного переменного тока синусоидальной формы равна 50 Гц. Поэтому, чтобы увеличить частоту тока до необходимого значения, якорь (ротор) генератора снабжают несколькими обмотками. Такой генератор дает переменный ток частотой:

$$\nu = n \cdot f, \quad (7.3)$$

здесь n — число пар полюсов; f — частота вращения ротора.

Для паровых турбин, ротор которых вращается очень быстро, используют якорь с одной обмоткой. В этом случае частота вращения ротора совпадает с частотой переменного тока, т. е. ротор должен делать 50 об/с.

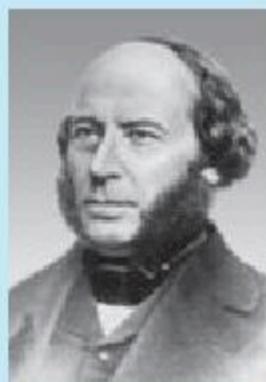
Для увеличения амплитудного значения ЭДС индукции нужно либо увеличивать индукцию магнитного поля, пронизывающего обмотки якоря, либо увеличивать число витков его обмоток. Для увеличения индукции магнитного поля \vec{B} обмотку индуктора размещают в стальном сердечнике, а зазор между сердечниками якоря и индуктора делают как можно меньшим.

Современные мощные генераторы вырабатывают напряжение (15—20) кВ и имеют КПД (97—98) %.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Первым, кто объяснил возможность получения переменного тока на основе электромагнитной индукции, был Майкл Фарадей. Первый генератор переменного тока, основанный на принципе Фарадея, в 1832 году сконструировал французский ученый изобретатель Ипполит Пикси. Этот генератор представлял собой вращающийся магнит подковообразной формы, приводимый в движение вращением рычага. Между полюсами магнита были установлены две неподвижные катушки индуктивности с железным сердечником.

В дальнейшем к этому устройству был добавлен коммутатор для получения постоянного пульсирующего тока, чем оно и было приведено к широко узнаваемой сегодня конструкции.



Ипполит Пикси
(1808–1835)



а)



б)



в)

Рис. 7.4 Генераторы переменного тока

На сегодняшний день разработано множество генераторов переменного тока различных типов и конструкций. Они широко используются для выработки электроэнергии, как в электростанциях, так и в качестве автономных источников электроэнергии в частных домах и дачах, когда отсутствует электроснабжение (рис. 7.4, а), для питания электрических систем различного вида транспорта: в автомобилях (рис. 7.4, б), в тепловозах с электрической передачей, в морских кораблях (рис. 7.4, в) и т. д.

Автономные генераторы используют для ремонтных, строительных и производственных предприятий в любой отрасли народного хозяйства и промышленности. Дублирование основного электроснабжения для клиник и больниц с реанимационными и хирургическими отделениями жизненно важно, ведь от этого зависят человеческие жизни.

Генераторы переменного тока нашли широкое применение в быту и на производстве благодаря компактности, безотказности и мобильности. Широкий спектр применения делает их универсальными устройствами, способными производить ток не только для нужд производства, но и в быту.



1. Почему в рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, возбуждается ЭДС и от каких величин она зависит?
2. Выведите закон изменения ЭДС, индуцируемой во вращающейся в магнитном поле рамке.
3. Можно ли получить переменный ток в неподвижной рамке? Если да, то каким образом?
4. Из каких основных частей состоит генератор переменного тока?
5. Объясните роль ротора и статора в работе генератора.
6. В чем преимущество многополюсного генератора переменного тока?
7. Объясните, как можно вывести индукционный ток во внешнюю цепь.



Изучите текст данного параграфа и, используя полученную информацию, устно выберите правильный ответ для каждого утверждения, приведенного в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Утверждение	Правильно	Неправильно	Нет информации
Работа генератора переменного тока основана на возбуждении в цепи автоколебаний			
В основе работы генератора переменного тока лежит явление электромагнитной индукции			
Генератор переменного тока преобразовывает постоянный ток в переменный			
Генераторы переменного тока делятся на синхронный и асинхронный			
В индукторе генератора создается магнитное поле			
Подвижная часть генератора называется ротором			
В генераторе любой конструкции вращается якорь			
Если якорь генератора содержит только одну обмотку, он называется однофазным			
Чтобы увеличить частоту вырабатываемого переменного тока, якорь генератора снабжают несколькими обмотками			
Три однофазных генератора, соединенных в одной электрической машине, в которых индуцированные ЭДС сдвинуты по фазе на 120° , называется трехфазным генератором			

Пример решения задачи

Проволочная рамка площадью $S = 100 \text{ см}^2$ с $N = 200$ витками вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$. Период вращения рамки $T = 0,1 \text{ с}$. Напишите уравнение зависимости от времени ЭДС, которая индуцируется в рамке, и определите ее амплитудное значение. Ось вращения перпендикулярна магнитному полю.

Дано:

$$B = 0,5 \text{ Тл}$$

$$T = 0,1 \text{ с}$$

$$N = 200$$

$$S = 100 \text{ см}^2$$

$$\mathcal{E}(t) = ? \quad \mathcal{E}_m = ?$$

Решение. В каждом витке рамки индуцируется ЭДС:

$$\mathcal{E}_0 = -\Phi' = \mathcal{E}_{m_0} \sin \omega t, \text{ где } \mathcal{E}_{m_0} = BS\omega.$$

$$\text{Тогда в } N \text{ витках: } \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 N = N\mathcal{E}_{m_0} \sin \omega t$$

Амплитудное значение ЭДС:

$$\mathcal{E}_m = N\mathcal{E}_{m_0} = NBS\omega = NBS \frac{2\pi}{T}$$

$$\mathcal{E}_m = 200 \cdot 0,5 \text{ Тл} \cdot 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \frac{6,28}{0,1 \text{ с}} = 62,8 \text{ В}$$

Уравнение колебаний ЭДС:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t = \mathcal{E}_m \sin(2\pi/T) \cdot t$$

$$\mathcal{E} = 62,8 \sin(6,28/0,1) \cdot t = 62,8 \sin 62,8t.$$



Упражнение 4

1. Проволочная рамка площадью $S = 300 \text{ см}^2$ равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$ вокруг оси, перпендикулярной линиям индукции, с частотой $\nu = 50 \text{ об/с}$. Определите период и максимальное значение ЭДС, которая индуцируется в рамке.

Ответ: 0,02 с; 4,71 В

2. Замкнутый контур в виде квадрата со стороной a , равной 8 см, равномерно вращается с угловой скоростью $\omega = 100 \text{ рад/с}$ в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,03 \text{ Тл}$. Ось вращения проходит через центр рамки перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Найдите период колебаний и амплитудное значение ЭДС индукции.

Ответ: 0,06 с; 19,2 мВ.

3. В рамке, вращающейся в однородном магнитном поле, индуцируется ЭДС, которая меняется по закону: $\mathcal{E} = 50 \sin(10^3 \pi t)$ (В). Определите амплитуду, период, частоту, фазу и начальную фазу колебаний ЭДС.

Ответ: 50 В; $2 \cdot 10^{-3}$ с; 500 об/с; $3,14 \cdot 10^3 t$; $\varphi_0 = 0$.

- *4. Сколько витков имеет рамка площадью $S = 500 \text{ см}^2$, если при вращении ее с частотой $\nu = 20 \text{ Гц}$ в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$ индуцируется ЭДС, амплитуда которой равна 63 В?

Ответ: 100.

- *5. Изменение ЭДС с течением времени задано уравнением: $\mathcal{E} = 100 \sin 800 \pi t$ (В). Найти амплитуду, период, частоту, фазу и начальную фазу колебаний ЭДС.

Ответ: $\mathcal{E}_m = 100 \text{ В}$, $\nu = 400 \text{ Гц}$,
 $T = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, $\varphi = 800 \pi t$; $\varphi_0 = 0$

- *6. Проволочный виток радиусом $r = 4 \text{ см}$ равномерно вращается с частотой $\nu = 50 \text{ Гц}$ в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,04 \text{ Тл}$. Ось вращения, проходящая через центр витка, лежит в плоскости витка и образует угол $\alpha = 60^\circ$ с линиями индукции магнитного поля. Определите амплитуду ЭДС, которая индуцируется в витке.

Ответ: 63,1 мВ.

- *7. Проволочное кольцо радиусом $r = 10 \text{ см}$ находится в магнитном поле, индукция которого со временем изменяется по закону $B = 0,04 \cos 5 \pi t$. Плоскость кольца образует с линиями индукции магнитного поля угол $\alpha = 45^\circ$. Напишите закон изменения ЭДС, индуцируемой в кольце, и определите ее максимальное значение.

Ответ: $\mathcal{E} = 0,014 \sin 5 \pi t$ (В); 14 мВ.

§8. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток



Ключевые понятия:

- ✓ вынужденные электромагнитные колебания
- ✓ переменный ток
- ✓ частота переменного тока
- ✓ максимальное значение тока и напряжения
- ✓ эффективное значение силы тока
- ✓ эффективное значение напряжения в цепи переменного тока



На этом уроке вы:

- познакомитесь с основными характеристиками переменного тока.

Вынужденные электромагнитные колебания.

Это вы знаете

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего источника.

Для установления в электрической цепи вынужденных колебаний достаточно, разорвав замкнутый контур, подать на образовавшиеся контакты переменное напряжение $u = U_m \cos \omega t$. В практическом применении *переменный ток* имеет перед постоянным током неоспоримые преимущества. Во всех бытовых электрических приборах, во многих приборах, применяемых в промышленности, в агротехнике, в строительстве используется переменный ток. Переменное напряжение и силу тока можно преобразовывать в очень широких пределах почти без потерь энергии, что позволяет передавать электроэнергию на большие расстояния.

Переменный ток. Установившиеся в цепи вынужденные электромагнитные колебания можно рассматривать как протекание по проводникам переменного тока. При этом напряжение и сила тока в цепи периодически изменяются как по знаку, так и по модулю. *Электрический ток, который с течением времени периодически изменяется как по величине, так и по направлению, называется переменным.* При этом изменения напряжения и силы тока происходят по гармоническому закону.

Гармонические изменения напряжения на концах цепи вызывают такие же изменения напряженности электрического поля внутри проводников. А электрический ток, как мы знаем, возникает именно благодаря этому полю, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Если изменяется напряженность электрического поля внутри проводника, то меняется соответственно и сила тока. Изменения напряженности поля распространяются не мгновенно, а со скоростью света. Но эта скорость настолько высока, что по сравнению с периодом колебаний напряжения можно считать, что изменения поля распространяются внутри проводников почти мгновенно. Поэтому при изменении напряжения на концах цепи электрическое поле меняется практически сразу во всей цепи, а значит, и сила тока во всех сечениях контура в данный момент времени имеет одинаковые значения.

Таким образом, *в цепи переменного тока сила тока в каждый момент времени во всех сечениях контура практически одинакова.*

Такой ток называют *квазистационарным*. Для квазистационарного тока справедлив закон Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}_m}{R}.$$

Переменный ток так же, как и постоянный, оказывает тепловое, магнитное и химическое действие. На этих действиях основана работа измерительных приборов переменного тока и напряжения. Проводник, по которому течет переменный ток, нагревается. Работу и мощность переменного тока можно рассчитывать по тем же формулам, что и для постоянного тока. Но, как уже было сказано, сила переменного тока с течением времени периодически меняются от нуля до максимального значения. Поэтому, в цепи переменного тока когда мы говорим о силе тока или напряжении, имеется ввиду их мгновенные значения, или так называемые эффективные значения.

Рассмотрим простейшую электрическую цепь, состоящую только из резистора и источника переменного напряжения:

$$u = U_m \cos \omega t. \quad (8.1)$$

В этом выражении u — *мгновенное значение*, U_m — *максимальное, или амплитудное значение напряжения*.

По закону Ома сила тока в цепи: $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t$

Обозначим $I_m = \frac{U_m}{R}$ — *максимальное (амплитудное) значение силы тока*.

Тогда:

$$i = I_m \cos \omega t \quad (8.2)$$

Сравнивая выражения (8.1) и (8.2), можно сделать вывод, что в цепи, содержащей кроме источника тока только резистор, колебания напряжения и силы тока происходят с одинаковой частотой и совпадают по фазе, одновременно достигая максимумов и минимумов. В общем случае, когда цепь содержит кроме резистора катушку и (или) конденсатор, колебания силы тока и напряжения имеют одинаковую частоту, но разные фазы. Поэтому в цепи переменного тока возникают новые закономерности, знакомые нам формулы для постоянного тока могут принять несколько иные формы для переменного тока. Эти случаи мы подробно рассмотрим в следующем параграфе.

Кроме максимального и мгновенного значений силы тока (напряжения) переменный ток характеризуется периодом и частотой.

Частота колебаний (ν) силы переменного тока равна числу полных колебаний силы тока в единицу времени. Единица измерения частоты в системе СИ — Герц (Гц)

Циклическая частота (ω) колебаний силы тока — это величина, равная числу полных колебаний силы тока за 2π секунд. В системе СИ единица измерения циклической частоты — радиан в секунду $[\omega] = \text{рад/с}$. Так как радиан является безразмерной величиной, размерность циклической частоты ω можно представить в виде $[\omega] = \text{с}^{-1}$.

Период колебаний (T) силы тока — это время одного полного колебания силы тока. В системе СИ единица измерения T — секунда, то есть размерность $[T] = \text{с}$. Нам известно, что переменный ток вырабатывается генератором переменного тока. Отметим, что переменный ток в цепи проходит в одном направлении в течение полуоборота ротора генератора, а затем меняет направление на противоположное, которое остается неизменным в течение следующего полуоборота.

Частота переменного тока в осветительной сети наших домов, на заводах и фабриках равна 50 Гц, это значение является стандартным в нашей стране и во многих других странах мира. В США частота промышленного тока 60 Гц.

Если включить в розетку в нашем доме обычную лампу накаливания, то ее освещенность будет меняться 100 раз в секунду вследствие периодических изменений напряжения. Но таких частых миганий наши глаза различить не могут, нам кажется, что лампа горит непрерывно. Наши глаза воспринимают усредненную освещенность, создаваемую электрической лампой за достаточно большой промежуток времени. Амперметрами и вольтметрами мы можем измерять силу тока и напряжение в цепи переменного тока. Но ведь в данном случае значения и силы тока, и напряжения все время изменяются. Какое значение тогда показывают измерительные приборы?

Чтобы это выяснить, рассчитаем *среднюю мощность за один период колебаний* в нашей лампочке. Так как для мгновенных значений силы тока и напряжения справедливы законы постоянного тока, мгновенную мощность переменного тока определим по известной формуле: $p = i^2 R$. Вместо силы тока подставим формулу (8.2):

$$p = I_m^2 R \cos^2 \omega t$$

и воспользуемся тригонометрическим соотношением $\cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$, тогда:

$$p = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2} \cos 2\omega t.$$

Как известно, наибольшее значение косинуса равно $+1$, а наименьшее -1 . Следовательно, среднее значение $\cos 2\omega t$ за один период равно нулю. Таким образом, средняя мощность определяется только первым слагаемым:

$$p = \frac{I_m^2 R}{2}. \quad (8.3)$$

Обозначим через $I_{\text{эф}}$ силу постоянного тока, при которой в данной нагрузке выделяется такая же мощность, что и при протекании переменного тока. Тогда $p = I_{\text{эф}}^2 R$. Сравнивая это выражение с (8.2) имеем:

$$\frac{I_m^2 R}{2} = I_{\text{эф}}^2 R,$$

отсюда:

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (8.4)$$

Действующим, или эффективным значением силы переменного тока $I_{\text{эф}}$ называют силу такого постоянного тока, который за одинаковое время выделяет в проводнике такое же количество теплоты, как и определяемый переменный ток. Действующее значение напряжения определяется по аналогичной формуле:

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (8.5)$$

Для эффективных значений силы тока и напряжения справедлив закон Ома.

Электроизмерительные приборы показывают эффективные значения силы тока и напряжения.



1. Что такое переменный ток?
2. Почему мгновенные значения силы тока во всех сечениях замкнутой цепи в каждый данный момент одинаковы?
3. Сравните переменный ток с постоянным. В чем их сходство и различие?
4. Дайте определения основных характеристик переменного тока.
5. Как определяются действующие (эффективные) значения силы тока и напряжения?
6. Какова частота промышленного тока?
7. Наши бытовые приборы работают от сети напряжением 220В. Какое значение напряжения имеется ввиду?

Пример решения задачи

Задача. Напряжение на концах участка цепи переменного тока меняется по закону $u = 110\cos 100\pi t$. Определите действующее значение напряжения U и частоту колебаний ν .

Дано:
 $u = 110\cos 100\pi t$

 $U = ? \quad \nu = ?$

Решение. Сравнивая уравнение $u = 110\cos 100\pi t$ с уравнением $U = U_m \cos \omega t$ находим:

- 1) амплитудное значение напряжения $U_m = 110 \text{ В};$
- 2) действующее значение напряжения

$$U_s = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{110}{\sqrt{2}} = 78 \text{ В};$$

- 3) частота $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50 \text{ Гц}.$



Упражнение 5

1. В цепи переменного тока с резистором сопротивлением $R = 400 \text{ Ом}$ напряжение меняется по закону $u = 220\cos 100\pi t$. Напишите уравнение колебаний тока в этой цепи. Найдите силу тока в момент времени $t = \frac{T}{4}$.

Ответ: $i = 0,55\cos 100\pi t; 0.$

2. В цепи переменного тока с сопротивлением $R = 50 \text{ Ом}$ амплитудное значение напряжения 100 В , частота колебаний $\nu = 100 \text{ Гц}$. Напишите уравнение колебаний тока в этой цепи.

Ответ: $i = 2\cos \cdot 200\pi t \text{ (А)}.$

3. Действующее значение силы тока $I = 0,1 \text{ А}$. Определите мгновенное значение силы тока в момент времени $t = \frac{3T}{2}$.

Ответ: $-0,141 \text{ А}.$



*4. Нагревательный прибор мощностью $P = 1$ кВт питается от сети $U = 220$ В. Каковы действующее и амплитудное значения силы переменного тока, протекающего по прибору?

Ответ: 4,54 А; 6,4 А.

*5. Сила тока в цепи изменяется со временем по закону $i = 8,5 \sin 628t$. Определите действующее значение силы тока и его частоту.

Ответ: 6,03А; 0,325, 100 Гц.

*6. Напряжение на концах участка цепи изменяется по закону $u = U_m \sin(\omega t + \pi/6)$. В момент $t = \frac{T}{12}$ напряжение $u = 10$ В. Определите эффективное значение напряжения.

Ответ: 8,2 В.

§ 9. Активное и реактивное сопротивления в цепи переменного тока



Ключевые понятия:

- ✓ активное сопротивление
- ✓ емкостное сопротивление
- ✓ конденсатор
- ✓ индуктивное сопротивление
- ✓ катушка
- ✓ реактивная нагрузка
- ✓ сдвиг фаз

На этом уроке вы:

- исследуете цепи переменного тока с активной и реактивной нагрузкой;
- определите сдвиг фаз между напряжением и силой тока для каждого из рассмотренных случаев.



Активное сопротивление в цепи переменного тока. В цепи переменного тока ранее известная нам величина — электрическое сопротивление резисторов, подводящих проводов, ламп накаливания, спиралей различных нагревательных приборов и т. д., — называется *активным сопротивлением*.

Дело в том, что в цепи переменного тока могут быть еще сопротивления, обусловленные индуктивностью и емкостью. Но тепловая энергия выделяется только на активном сопротивлении.

Это вы знаете

В цепи переменного тока, содержащей кроме источника тока только резистор, колебания напряжения и силы тока происходят по законам: $u = U_m \cos \omega t$; $i = I_m \cos \omega t$. Сравнивая эти уравнения приходим к выводу, что колебания силы тока и напряжения совпадают как по частоте, так и по фазе, одновременно достигая максимумов и минимумов.

Таким образом, колебания силы тока и напряжения в цепи, содержащей только активное сопротивление (рис. 9.1), происходят синфазно.

Графики зависимости силы тока и напряжения от времени в цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление, представлены на рисунке 9.2.

Для наглядного представления фазовых соотношений между током и напряжением можно использовать метод векторных диаграмм (см. § 6). Амплитуда силы переменного тока и амплитуда переменного напряжения изображаются как параллельные векторы, угол между ними, а значит, сдвиг фаз равен нулю (рис. 9.3).

Реактивное сопротивление. Для постоянного тока индуктивная катушка является обычным проводником, и мы имеем дело с активным сопротивлением. Через конденсатор постоянный ток не проходит.

В случае переменного тока сопротивление катушки индуктивности или конденсатора зависит от множества факторов: частоты самого тока, емкости конденсатора или индуктивности катушки. *Сопротивление прохождению электрического тока в цепи переменного тока, обусловленное наличием в ней индуктивности и (или) емкости называется реактивным.*

Конденсатор в цепи переменного тока. Замкнем конденсатор емкостью C источником переменного напряжения $u = U_m \cos \omega t$ (рис. 9.4.). Тогда конденсатор будет все время перезаряжаться и во внешней цепи потечет ток.

Если в цепь на рисунке 9.4. последовательно с конденсатором подсоединить лампу накаливания, то при большой емкости конденсатора она загорится. Постоянный же ток не может протекать в цепи, содержащей конденсатор. Ведь при этом цепь оказывается разомкнутой, так

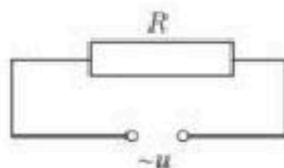


Рис. 9.1. Цепь переменного тока, содержащая только активное сопротивление

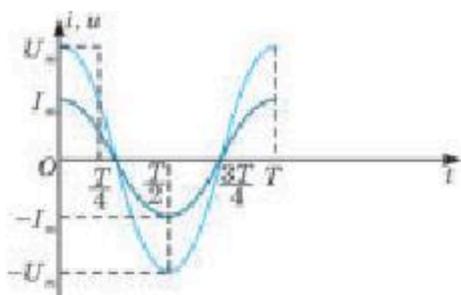


Рис. 9.2. Графики зависимости силы тока и напряжения в цепи переменного тока

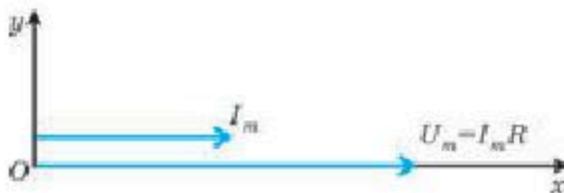


Рис. 9.3. Векторная диаграмма для цепи переменного тока только с активным сопротивлением

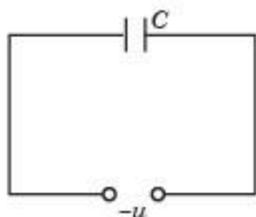


Рис. 9.4. Конденсатор в цепи переменного тока

как обкладки конденсатора разделены диэлектриком. В цепи переменного тока между обкладками конденсатора электрические заряды также не проходят, но в результате периодической зарядки и разрядки конденсатора по проводам, соединяющим его с источником напряжения, течет переменный ток. Если пренебречь сопротивлением подводящих проводов, то такая цепь состоит только из конденсатора, к которому приложено переменное напряжение $u = U_m \cos \omega t$.

Как известно из курса физики 10 класса, напряжение на конденсаторе связано с его емкостью соотношением $u = \frac{q}{C}$, где q — заряд на обкладках конденсатора. Необходимо помнить, что емкость конденсатора не зависит ни от величины заряда на его обкладках, ни от величины напряжения между ними. Заряд на обкладках конденсатора будет изменяться по закону изменения напряжения: $q = Cu$ или $q = U_m \cdot C \cdot \cos \omega t$.

Сила тока равна первой производной от заряда по времени:

$$i = q' = -U_m C \omega \sin \omega t = U_m C \omega \cos(\omega t + \pi/2)$$

Введем обозначение:

$$I_m = \omega C U_m, \tag{9.1}$$

тогда:

$$i = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}). \tag{9.2}$$

Сравнив уравнение (9.2) с уравнением напряжения $u = U_m \cos \omega t$, приложенного к конденсатору, приходим к выводу, что *колебания силы тока опережают колебания напряжения на конденсаторе на $\frac{\pi}{2}$* .

Графики зависимости силы тока и напряжения от времени и векторная диаграмма представлены на рисунках 9.5 и 9.6 соответственно.

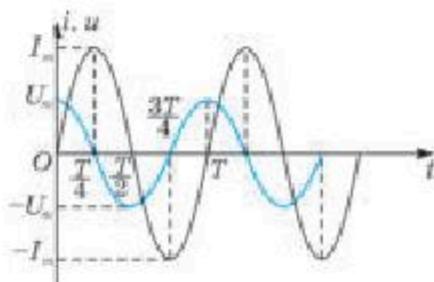


Рис. 9.5

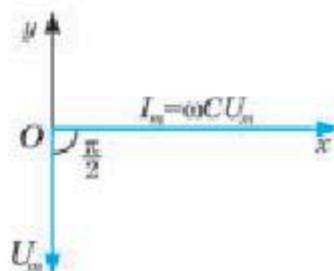


Рис. 9.6

Выражение (9.1) определяет амплитуду силы тока. Введем обозначение:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (9.3)$$

И подставим его в уравнение (9.1):

$$I_m = \frac{U_m}{X_c},$$

мы получили закон Ома, где вместо сопротивления стоит величина, обратная произведению циклической частоты на электрическую емкость $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{U_m}{I_m}$. Эта величина называется емкостным сопротивлением. Видно, что емкостное сопротивление тем меньше, чем больше емкость конденсатора. Емкостное сопротивление также обратно пропорционально частоте: чем больше частота, тем оно меньше. Поэтому при постоянном значении амплитуды напряжения в цепи переменного тока амплитуда силы тока возрастает с ростом частоты ω . Для постоянного тока $\omega = 0$ емкостное сопротивление бесконечно велико ($X_c = \infty$) и ток в цепи не течет.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока. Индуктивность в цепи переменного тока создает дополнительное сопротивление. Объяснить это можно явлением самоиндукции (см. 10 класс).

Пусть цепь переменного тока содержит только катушку индуктивности (рис. 9.7), активное сопротивление которой примем равным нулю.

В катушке возникнет ЭДС самоиндукции, мгновенное значение которой \mathcal{E}_{is} равно:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -Li', \quad (9.4)$$

где i' — первая производная силы тока по времени.

По закону Ома

$$iR = \mathcal{E}_{is} + u, \quad (9.5)$$

где R — активное сопротивление катушки; u — мгновенное напряжение на ее концах. В идеальной катушке $R = 0$, и уравнение (9.5) принимает вид:

$$0 = \mathcal{E}_{is} + u, \text{ или } u = -\mathcal{E}_{is}.$$

Так как сила тока изменяется по закону

$$i = I_m \cos \omega t \quad (9.6)$$

ЭДС самоиндукции равна:

$$\mathcal{E}_{is} = -Li' = -\omega LI_m \sin \omega t.$$

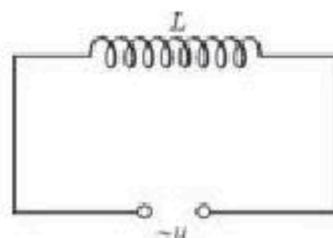


Рис. 9.7

Так как $u = -\dot{\varphi}_{is}$, то напряжение равно:

$$u = \omega LI_m \cos \omega t = \omega LI_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2});$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (9.7)$$

где $U_m = \omega LI_m$ — амплитуда напряжения.

Сравнивая уравнения (9.6) и (9.7), приходим к выводу, что колебания силы тока в катушке отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$.

Амплитуда силы тока в катушке равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}.$$

Эта формула представляет собой не что иное, как закон Ома для цепи переменного тока с идеальной катушкой индуктивности. Выражение ωL называется индуктивным сопротивлением катушки и обозначается X_L :

$$X_L = \omega L. \quad (9.8)$$

Если вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{X_L}.$$

Из выражения (9.8) видно, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально индуктивности и циклической частоте переменного тока. Чем больше индуктивность, тем больше сопротивление. Так же чем больше частота переменного тока, тем больше индуктивное сопротивление. Для постоянного тока $\omega = 0$ и индуктивное сопротивление тоже равно нулю. Графики зависимости силы тока и напряжения в цепи переменного тока приведены на рисунке 9.8, а векторная диаграмма представлена на рисунке 9.9. Из рисунков видно, что колебания напряжения опережают колебания силы тока по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

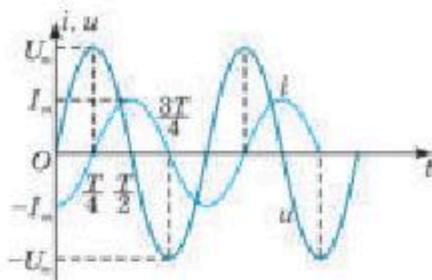


Рис. 9.8

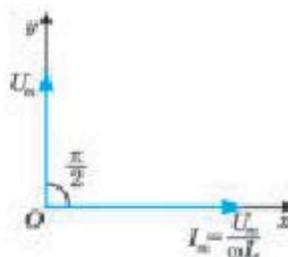


Рис. 9.9



1. Какое сопротивление называют активным?
2. Каковы фазовые соотношения между колебаниями силы тока и напряжения в цепи переменного тока с активным сопротивлением?
3. Нарисуйте и объясните графики зависимости силы тока и напряжения в цепи переменного тока с активным сопротивлением, если напряжение изменяется по закону $u = U_m \sin \omega t$.
4. Что такое емкостное сопротивление?
5. От каких величин зависит емкостное сопротивление?
6. Каковы фазовые соотношения между колебаниями силы тока и напряжения при наличии в цепи только емкостного сопротивления?
7. Почему в цепи постоянного тока с конденсатором ток не течет, а переменный ток течет?
8. В сеть переменного тока включена лампа накаливания. Изменится ли сколько-нибудь существенно излучаемая лампой световая энергия, если последовательно с ней включить конденсатор? Ответ обоснуйте
9. Что такое индуктивное сопротивление?
10. Как изменяется индуктивное сопротивление при увеличении индуктивности катушки? Почему?
11. Объясните влияние индуктивности на величину силы переменного тока.
12. Катушку индуктивности один раз включили в цепь постоянного тока, второй раз — в цепь переменного тока с таким же эффективным значением напряжения, как и в первом случае. В каком случае сила тока в цепи имеет большее значение? Ответ обоснуйте
13. Катушка, состоящая из нескольких десятков витков тонкой медной проволоки, рассчитана на напряжение 120 В. Ученик подключил ее в сеть с напряжением 120 В, но выбрал для этого паруклемм постоянного, а не переменного тока. Что при этом произойдет?



1. Участок цепи переменного тока содержит только конденсатор, к обкладкам которого приложено напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$. Постройте и объясните графики зависимости силы тока и напряжения от времени в цепи, если: а) $\varphi_0 = 0$; б) $\varphi_0 = \pi/4$. Постройте векторную диаграмму. Сделайте выводы.
2. Начертите и объясните графики зависимости силы тока и напряжения в цепи переменного тока с индуктивным сопротивлением, если сила тока изменяется по закону $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, в случае, когда: а) $\varphi_0 = 0$; б) $\varphi_0 = \pi/4$. Активное сопротивление равно нулю. Постройте векторную диаграмму. Сделайте выводы.

Пример решения задачи

Напряжение на участке цепи, содержащем резистор, меняется по закону $u = 180 \cos 314t$ (В). Эффективное значение силы тока на этом участке $I_{\text{эф}} = 1,7$ А. Какова емкость конденсатора, который на этом участке цепи оказывает такое же по величине сопротивление, как и резистор?

Дано:

$$u = 180 \cos 314 t \text{ (В)}$$

$$I_{\text{эф}} = 1,7 \text{ А}$$

$$R = X_C$$

$$C = ?$$

Решение. Из уравнения напряжения, данно-го в условиях задачи, находим его эффективное значение и циклическую частоту:

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{180}{\sqrt{2}} \text{ В}, \quad \omega = 314 \text{ рад/с.}$$

$$\text{Сопротивление резистора } R = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}.$$

По условию задачи $R = X_C = \frac{1}{\omega C}$, отсюда:

$$C = \frac{I_{\text{эф}}}{U_{\text{эф}} \cdot \omega}; \quad C = \frac{1,7}{\frac{180}{\sqrt{2}} \cdot 314} = 42 \text{ мкФ.}$$

$$C = 42 \text{ мкФ.}$$

**Упражнение 6**

1. Емкостное сопротивление конденсатора в цепи переменного тока частотой $\nu = 50$ Гц равно $X_C = 5$ Ом. Какова его емкость?
Ответ: $6,4 \cdot 10^{-4}$ Ф.
2. Конденсатор емкостью $C = 40$ мкФ представляет для переменного тока сопротивление $X_C = 8$ Ом. Определите частоту и период переменного тока.
Ответ: 497,6 Гц, 0,002 с.
- *3. Найдите емкостное сопротивление участка цепи переменного тока частотой $\nu = 50$ Гц, в которой последовательно включены два конденсатора емкостью $C = 1$ мкФ каждый.
Ответ: 6,4 кОм.
- *4. Определите емкостное сопротивление батареи из двух конденсаторов емкостью $C_1 = C_2 = 2$ мкФ, соединенных параллельно в цепь переменного тока частотой $\nu = 50$ Гц.
Ответ: 796 Ом.
- *5. Сила тока на участке цепи переменного тока с конденсатором меняется по закону $i = 0,1 \cos(314t + 1,57)$ А. Определите емкость конденсатора, если максимальное напряжение на нем $U_m = 60$ В.
Ответ: 5 мкФ.
6. Определите индуктивное сопротивление катушки индуктивностью $L = 5$ Гн, если частота переменного тока $\nu = 1$ кГц.
Ответ: 31,4 кОм.
7. Определите частоту и период переменного тока, если индуктивное сопротивление катушки индуктивностью $L = 2$ Гн равно $X_L = 628$ Ом.
Ответ: 50 Гц, 0,02 с.
- *8. Найдите индуктивность катушки, если амплитуда переменного напряжения на ее концах $U_m = 157$ В, амплитуда силы тока $I_m = 5$ А, частота тока $\nu = 50$ Гц. Активное сопротивление катушки равно нулю.
Ответ: 0,1 Гн.
- *9. При подключении катушки индуктивности в цепь переменного тока с частотой $\nu_1 = 50$ Гц эффективное значение силы тока в катушке $I_1 = 2$ А. Определите силу тока в катушке при увеличении частоты в два раза.
Ответ: 1 А.

§ 10. Закон Ома для последовательной электрической цепи переменного тока



Ключевые понятия:

- ✓ активное сопротивление
- ✓ реактивное сопротивление
- ✓ полное сопротивление
- ✓ закон Ома для последовательной цепи переменного тока

На этом уроке вы:

- познакомитесь с понятием полного сопротивления в цепи переменного тока и изучите закон Ома для цепи переменного тока, содержащей R , L , C элементы.



В предыдущем параграфе мы выяснили, что колебания напряжения и силы переменного тока в цепи происходят всегда с одинаковой частотой, но их фазовые соотношения зависят от вида нагрузки. Если цепь содержит только активную нагрузку, напряжение и сила тока колеблются синфазно. Когда в цепи имеется только емкостное сопротивление, колебания силы тока опережают колебания напряжения на конденсаторе на $\frac{\pi}{2}$, если же цепь содержит только индуктивную катушку с ничтожно малым активным сопротивлением, колебания силы тока в катушке отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$.

А каковы будут фазовые соотношения силы тока и напряжения, если цепь содержит все три вида сопротивления? Чтобы это выяснить, рассмотрим цепь, состоящую из последовательно включенных резистора сопротивлением R , конденсатора емкостью C и катушки индуктивностью L . Такую цепь называют *полной цепью переменного тока*. Приложим к зажимам цепи переменное напряжение $u = U_m \cos \omega t$ (рис. 10.1). Сила переменного тока, как мгновенное значение i , так и амплитудное значение I_m , на всех участках последовательной цепи одинакова. Мгновенное напряжение на полюсах источника тока равно сумме мгновенных напряжений на ее отдельных участках:

$$u = u_R + u_C + u_L$$

В цепи возникнут вынужденные колебания, т. е. переменный ток.

Амплитуду напряжения на резисторе, конденсаторе и катушке обозначим соответственно U_{mR} , U_{mC} и U_{mL} . Изобразим эти напряжения на векторной диаграмме (рис. 10.2). По горизонтальной оси отло-

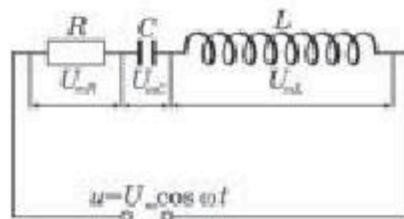


Рис. 10.1. Последовательная цепь переменного тока

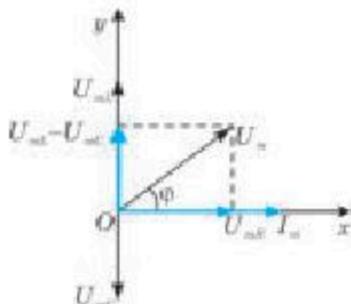


Рис. 10.2. Векторная диаграмма для последовательной цепи переменного тока

жим вектор амплитуды силы тока I_m . Тогда углы между горизонтальной осью и вектором амплитуды каждого напряжения будут равны разности фаз между колебаниями тока и соответствующего напряжения.

Колебания напряжения на активном сопротивлении совпадают по фазе с колебаниями силы тока, колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний силы тока на $\frac{\pi}{2}$ и, наконец, колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$.

Амплитуда приложенного напряжения U_m равна модулю суммы векторов:

$$\vec{U}_m = \vec{U}_{mR} + \vec{U}_{mC} + \vec{U}_{mL}$$

Стрелки над обозначением напряжений, конечно, не означают, что напряжение — векторная величина, это просто векторы, модули которых равны указанным напряжениям. Из рисунка 10.2 видно, что амплитуда напряжений на всей цепи по теореме Пифагора равна:

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

Согласно закону Ома:

$$U_{mL} = I_m X_L, U_{mC} = I_m X_C \text{ и } U_{mR} = I_m R$$

Подставим эти значения в выше приведенное выражение:

$$U_m = \sqrt{I_m^2 R^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2} = I_m \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

Откуда

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \tag{10.1}$$

Сопротивление $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ называется реактивным сопротивлением, а сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{10.2}$$

— полным сопротивлением цепи переменного тока.

Разность фаз φ определим, воспользовавшись векторной диаграммой:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= \frac{U_{mL} - U_{mC}}{U_{mR}} \text{ или} \\ \operatorname{tg}\varphi &= \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}, \end{aligned} \quad (10.3)$$

Уравнение (10.1) называют *законом Ома для полной цепи переменного тока*. Поскольку $X_L = \omega L$ и $X_C = \frac{1}{\omega C}$, формулу (10.1) можно записать так:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (10.4)$$

С учетом сдвига фаз уравнение колебаний силы тока в цепи будет иметь вид:

$$i = I_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (10.5)$$

Рассмотрим частный случай, когда в цепи отсутствует конденсатор, и построим векторную диаграмму (рис. 10.3).

Если в цепи нет конденсатора, закон Ома для амплитудных значений силы тока и напряжения $I_m = \frac{U_m}{Z}$ можно записать в виде: $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$, сдвиг фаз: $\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_{mL}}{U_{mR}} = \frac{\omega L}{R}$

Эти два последних выражения совпадают с (10.3) и (10.4), если в них $\frac{1}{\omega C} = 0$ т. е., если $C = \infty$. Следовательно, *отсутствие конденсатора в цепи означает, что $C = \infty$, а не $C = 0$!* Действительно, сближая обкладки конденсатора до нуля, получаем цепь, где нет конденсатора. При этом из формулы $C = \frac{\operatorname{Sxx}_0}{d}$ (см. 10 класс), полагая, что $d = 0$, получим $C = \infty$.

Как уже было отмечено, энергия, поступающая от генератора, выделяется в виде тепловой энергии только на активном сопротивлении. На реактивном сопротивлении поглощения энергии не происходит, а наблюдается периодическое преобразование энергии электрического и магнитного полей. В течение первой четверти периода, когда конденсатор заряжается, энергия поступает в цепь и запасается в виде энергии электрического поля. В следующую четверть периода, при разрядке конденсатора эта энергия обратно поступает в цепь в форме энергии магнитного поля.

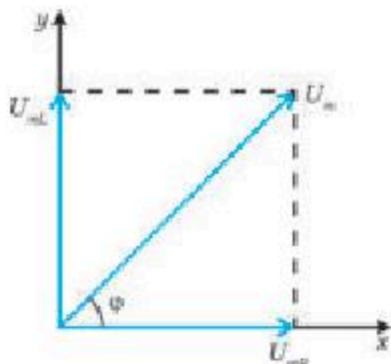


Рис. 10.3



1. Какие элементы содержит полная цепь переменного тока?
2. Напишите закон Ома для цепи переменного тока.
3. От каких величин зависит сдвиг фаз колебаний силы тока и напряжения в последовательной R, L, C цепи?
4. Объясните векторную диаграмму, изображенную на рисунке 10.3.
5. Чему равно полное сопротивление цепи переменного тока? Как можно вывести эту формулу?



1. Постройте векторную диаграмму для случаев: а) $X_L = 0, R \neq 0, X_C \neq 0$; б) $X_C = 0, R \neq 0, X_L \neq 0$; в) $R = 0, X_L \neq 0, X_C \neq 0$.
2. Составьте две задачи на полное сопротивление и закон Ома для переменного тока. Поменяйтесь задачами с соседом по парте, решите их. Проведите совместное обсуждение содержания и решения каждой задачи, проведите взаимное оценивание.

Пример решения задачи

В сеть переменного тока с эффективным напряжением $U_{\text{эф}} = 110$ В включены последовательно конденсатор емкостью $C = 5 \cdot 10^{-5}$ Ф, катушка индуктивностью $L = 400$ мГн и активным сопротивлением $R = 10$ Ом. Определите амплитуду силы тока в цепи, если частота переменного тока $\nu = 50$ Гц.

Дано:

$$U_{\text{эф}} = 110 \text{ В}$$

$$C = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$L = 400 \text{ мГн} = 0,4 \text{ Гн}$$

$$R = 10 \text{ Ом}$$

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$I_m = ?$$

Решение. Запишем закон Ома для переменного тока:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \text{ где } \omega = 2\pi\nu.$$

Учитывая, что искомое амплитудное значение напряжения связано с его действующим значением соотношением $U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, найдем:

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

$$= \frac{110 \cdot 1,41}{\sqrt{100 + \left(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,4 - \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}\right)^2}} = 2,47 \text{ А.}$$

Ответ: 2,47А



Упражнение 7

1. В сеть с эффективным напряжением $U_{\text{эф}} = 127$ В и частотой $\nu = 200$ Гц, последовательно включили активное сопротивление $R = 199$ Ом и конденсатор емкостью $C = 40$ мкФ. Определите амплитуду силы тока в цепи.

Ответ: 0,83 А.

2. В сеть с эффективным напряжением $U_{\text{эф}} = 220$ В последовательно включены катушка индуктивностью $L = 0,16$ Гн, активным сопротивлением $R = 2$ Ом и конденсатор емкостью $C = 64$ мкФ. Частота тока $\nu = 200$ Гц. Определите эффективное значение силы тока в цепи.

Ответ: 1,2 А.

- *3. Конденсатор емкостью $C = 5$ мкФ и проводник сопротивлением $R = 150$ Ом включены последовательно в цепь переменного тока с эффективным напряжением $U_{\text{эф}} = 120$ В и частотой $\nu = 50$ Гц. Определите эффективное и максимальное значения силы тока и сдвиг фаз между током и напряжением.

Ответ: 0,18А; 0,26А; $76^\circ 49'$.

- *4. По участку цепи ABC , представленному на рисунке 10.4, течет синусоидальный ток. Эффективное напряжение на участке AB равно $U_{AB} = 30$ В, а на участке BC — $U_{BC} = 40$ В.



Рис. 10.4

Определите эффективное напряжение на участке AC .

Ответ: 50 В.

- *5. Измерив сопротивление катушки, включенной в сеть переменного тока, определили, что оно равно $R_1 = 110$ Ом. Сопротивление такой же катушки, но из провода с вдвое большим удельным сопротивлением, включенной в ту же сеть, оказалось равным $R_2 = 140$ Ом. Каково активное сопротивление первой катушки?

Ответ: 50 Ом.

§ 11. Мощность цепи переменного тока



Ключевые понятия:

- ✓ мгновенная мощность переменного тока
- ✓ активная мощность переменного тока
- ✓ реактивная мощность переменного тока
- ✓ коэффициент мощности

На этом уроке вы:

- познакомитесь с понятиями активной и реактивной мощности переменного тока;
- научитесь определять коэффициент мощности и решать задачи.



Это вы знаете

Сопротивления в цепи переменного тока разделяются на активное и реактивное. Энергия, поступающая от генератора, выделяется в виде тепловой энергии только на активном сопротивлении. На реактивном сопротивлении поглощения энергии не происходит, а наблюдается периодическое преобразование энергии электрического и магнитного полей.

Если к зажимам цепи, состоящей из последовательно соединенных активной и реактивной нагрузки, подать переменное напряжение $u = U_m \cos \omega t$, то уравнение колебаний силы тока в цепи будет иметь вид:

$i = I_m \cos(\omega t - \varphi)$. Разность фаз колебаний напряжения и силы тока определяется

выражением: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$, т. е. зависит от соотношения активного и реактивного сопротивлений.

В соответствии с этим в цепях переменного тока вводятся понятия *активной и реактивной мощности*.

Активная мощность переменного тока. Мгновенная мощность в цепи переменного тока равна произведению мгновенных значений силы тока и напряжения:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m I_m \cos \omega t \cdot \cos(\omega t - \varphi).$$

Раскрыв $\cos(\omega t - \varphi)$, получим:

$$p(t) = U_m I_m (\cos^2 \omega t \cdot \cos \varphi + \cos \omega t \sin \omega t \sin \varphi).$$

Нас интересует среднее значение мощности за период колебаний.

Определим средние значения тригонометрических функций, зависящих от времени: $(\cos^2 \omega t)_{\text{cp}} = \frac{0 + 1}{2} = \frac{1}{2}$.

Так как $\cos \omega t \sin \omega t = \frac{\sin 2\omega t}{2}$, то $(\sin 2\omega t)_{\text{cp}} = \frac{-1 + 1}{2} = 0$. Таким образом, среднее значение второго слагаемого в выражении мощности

будет равно нулю. Тогда искомая активная средняя мощность в цепи переменного тока равна:

$$P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos\varphi. \quad (11.1)$$

Подставим в последнее выражение действующие значения силы тока и напряжения, для удобства обозначив их просто I и U :

$$P = IU \cos\varphi. \quad (11.2)$$

Здесь $\cos\varphi$ называется *коэффициентом мощности*. Из (11.2) видно, что в общем случае активная мощность, выделяемая в цепи переменного тока, зависит не только от значений силы тока и напряжения, но и от сдвига фаз колебаний между ними.

Для цепи, где отсутствует реактивное сопротивление $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$, и мы получим знакомую нам формулу $P = I \cdot U$ для мощности постоянного тока, где для переменного тока используются эффективные значения напряжения и силы тока. Если в цепи отсутствует активное сопротивление, то $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $\cos\varphi = 0$ и $P = 0$. Средняя активная мощность, выделяемая в цепи только с реактивным сопротивлением, равна нулю.

Выражение (11.2) также показывает, что для увеличения активной мощности переменного тока целесообразно увеличивать коэффициент мощности $\cos\varphi$, что и стремятся всегда делать. Для промышленных установок наименьшее допустимое значение $\cos\varphi = 0,85$.

Реактивная мощность цепи переменного тока. Реактивная мощность в цепи переменного тока определяется энергией, перекачиваемой от источника электрической энергии на реактивные элементы цепи: на катушки индуктивности, конденсаторы, обмотки двигателей и т. д., а затем возвращаемой этими элементами обратно в источник в течение одного периода колебаний, отнесенной к этому периоду.

Реактивная мощность обозначается буквой Q и определяется по формуле:

$$Q = U \cdot I \sin\varphi. \quad (11.3)$$

Единицей измерения реактивной мощности в СИ является вольт-ампер реактивный $[Q] = [B \cdot A_p]$.

Полная мощность цепи переменного тока обозначается буквой P_T . Она включает в себя как активную, так и реактивную составляющие, измеряется в вольт-амперах. Полная мощность цепи переменного тока определяется как произведение действующих значений силы тока и напряжения.

$$P_T = U \cdot I. \quad (11.4)$$

Чтобы определить соотношения между полной мощностью переменного тока и ее составляющими, построим векторную диаграмму напряжений (см. §10).

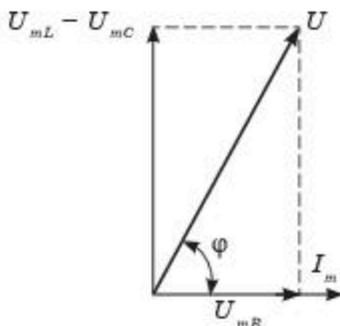


Рис. 11.1. Векторная диаграмма напряжений для цепи переменного тока

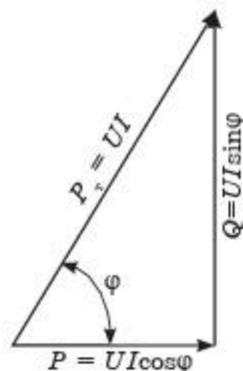


Рис. 11.2. Треугольник мощностей

Как мы уже знаем, в векторной диаграмме углы между векторами, изображающими амплитудные значения силы тока и напряжений, равны разности фаз колебаний соответствующих величин (рис. 11.1).

На основании диаграммы напряжений можно построить так называемый *треугольник мощностей* (рис. 11.2). Два катета этого треугольника представляют собой активную и реактивную мощности, а гипотенуза — полную мощность. Угол φ равен углу сдвига фаз тока и напряжения в цепи. Косинус этого угла называют коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_{\tau}}. \quad (11.5)$$

Из треугольника мощностей определим полную мощность цепи переменного тока:

$$P_{\tau} = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (11.6)$$



1. В чем заключается физический смысл понятия активная мощность переменного тока?
2. Как определяется активная мощность переменного тока?
3. Какая величина называется коэффициентом мощности?
4. Чему равна активная мощность в цепи, содержащей только реактивное сопротивление?
5. В чем заключается физический смысл понятия реактивная мощность переменного тока?
6. Как определяется реактивная мощность переменного тока?
7. Как можно определить полную мощность переменного тока?
- *8. Объясните векторную диаграмму на рисунке 11.1
- *9. Объясните, как построить треугольник мощностей? Как из него определить коэффициент мощности?

Пример решения задачи

К источнику переменного напряжения $u = 300\sin 200\pi t$ подключены последовательно катушка индуктивностью $L = 0,5$ Гн, конденсатор емкостью $C = 10$ мкФ и активное сопротивление $R = 100$ Ом. Определите амплитудное значение силы тока, сдвиг фаз между силой тока и напряжением, коэффициент мощности и потребляемую мощность.

Дано:

$$L = 0,5 \text{ Гн}$$

$$R = 100 \text{ Ом}$$

$$C = 10 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$u = 300\sin 200\pi t$$

$$I_m = ? \quad \varphi = ?$$

$$\cos\varphi = ? \quad P = ?$$

Решение. Из уравнения $u = 300\sin 200\pi t$ определим амплитудное значение напряжения $U_m = 300$ В и циклическую частоту $\omega = 200\pi$.

1) По закону Ома амплитудное значение

$$\text{силы тока } I_m = \frac{U_m}{Z}, \text{ где } Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

полное сопротивление цепи переменного тока.

$$\text{Тогда: } I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} =$$

$$= \frac{300}{\sqrt{10^4 \text{ Ом}^2 + \left(628 \text{ Гц} \cdot 0,5 \text{ Гн} - \frac{1}{628 \text{ Гц} \cdot 10^{-5} \text{ Ф}}\right)^2}} = 1,63 \text{ А.}$$

2) Сдвиг фаз определим по формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{628 \text{ Гц} \cdot 0,5 \text{ Гн} - \frac{1}{628 \text{ Гц} \cdot 10^{-5} \text{ Ф}}}{100 \text{ Ом}} = 1,55$$

По таблице определим значение сдвига фаз: $\varphi = 57^\circ 12'$.

3) Зная сдвиг фаз, по таблице определим коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,54$.

4) Мощность определим по формуле:

$$P = IU\cos\varphi = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cos\varphi = \frac{U_m^2}{2Z} \cos\varphi;$$

$$P = \frac{9 \cdot 10^4 \cdot 0,5 B^2}{2 \cdot \sqrt{10^4 \text{ Ом}^2 + \left(314 - \frac{10^5}{628}\right) \text{ Ом}^2}} = 132 \text{ Вт.}$$

Ответ: 1,63 А, 57°12', 0,54, 132 Вт.



Упражнение 8

1. В цепь переменного тока с эффективным напряжением $U_{\text{эф}} = 110 \text{ В}$ последовательно включены катушка индуктивностью $L = 0,2 \text{ Гн}$ и активное сопротивление $R = 20 \text{ Ом}$. Определите активную мощность переменного тока, если его частота $\nu = 50 \text{ Гц}$.

Ответ: 55 Вт.

2. К участку цепи подвели переменный ток. Эффективное напряжение $U_{\text{эф}} = 220 \text{ В}$, активное сопротивление участка $R = 100 \text{ Ом}$, а сдвиг фаз между током и напряжением $\varphi = 0,3\pi$. Определите мощность тока.

Ответ: 167 Вт.

3. Цепь переменного тока состоит из катушки индуктивностью $L = 0,5 \text{ Гн}$, активного сопротивления $R = 1 \text{ кОм}$ и конденсатора емкостью $C = 1 \text{ мкФ}$. Определите мощность, выделяемую в цепи, если амплитуда напряжения $U_m = 100 \text{ В}$, а частота тока $\nu = 50 \text{ Гц}$.

Ответ: 0,5 Вт.

4. В цепь переменного тока частотой $\nu = 50 \text{ Гц}$ с эффективным напряжением $U_{\text{эф}} = 220 \text{ В}$ подключены последовательно катушка индуктивностью $L = 0,5 \text{ Гн}$, активное сопротивление $R = 10 \text{ Ом}$ и конденсатор емкостью $C = 0,5 \text{ мкФ}$. Определите активную мощность.

Ответ: 1,2 мВт.

- *5. В сеть переменного тока с эффективным напряжением $U_{\text{эф}} = 110 \text{ В}$ и частотой $\nu = 50 \text{ Гц}$, последовательно включены катушка индуктивностью $L = 0,2 \text{ Гн}$, активное сопротивление $R = 20 \text{ Ом}$ и конденсатор, емкость которого может изменяться. При каком значении емкости мощность тока будет максимальной? Какова эта мощность?

Ответ: $C = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$, $P \approx 605 \text{ Вт}$.

§ 12. Резонанс напряжений в электрической цепи



Ключевые понятия:

- ✓ собственная частота контура
- ✓ частота внешнего периодического напряжения
- ✓ резонанс напряжений
- ✓ резонансное усиление напряжения

На этом уроке вы:

- познакомитесь с явлением резонанса напряжений, с условиями его возникновения и применениями;
- научитесь рассчитывать резонансную частоту.



Это вы знаете

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты собственных колебаний системы с частотой колебаний внешнего периодического вынуждающего воздействия называется резонансом.

Явление резонанса присуще как механическим, так и электромагнитным колебаниям. Переменный ток относится к вынужденным электромагнитным колебаниям, поэтому в цепи переменного тока, содержащего активную и реактивную нагрузки при выполнении определенных условий можно наблюдать явление резонанса. *Резонанс в цепи переменного тока с последовательно включенными источником переменного напряжения, емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением называется последовательным резонансом или резонансом напряжений.* Характерная черта резонанса напряжений — значительные напряжения на емкости и на индуктивности, намного превышающие приложенное к зажимам цепи переменное напряжение $u = U_m \cos \omega t$. То есть резонанс напряжений приводит к возрастанию напряжения на реактивных элементах, а резонансный ток будет ограничен ЭДС источника, его внутренним сопротивлением и активным сопротивлением цепи R . Таким образом, сопротивление последовательного контура на резонансной частоте минимально.

Определим, при каких условиях сопротивление последовательной цепи переменного тока будет минимальным. Полное сопротивление цепи переменного тока с последовательно включенными активным, емкостным и индуктивным сопротивлениями, равно $R_r = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$.

Оно становится минимальным и равным активному сопротивлению R , если

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (12.1)$$

При этом угол сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = 0, \text{ т. е. колебания тока и напряжения происходят синфазно.}$$

При этих условиях падение напряжения на активном сопротивлении равно приложенному к цепи напряжению $U_R = U$, а напряжения на конденсаторе U_C и катушке U_L равны друг другу по модулю и противоположны по фазе.

Амплитуда тока $I_m = \frac{U_m}{R}$ достигает очень больших значений, если активное сопротивление цепи R мало. Это и есть *резонанс напряжений в электрической цепи*.

Частота приложенного напряжения при резонансе должна удовлетворять соотношению (12.1). Из этого условия можно определить резонансную частоту:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (12.2)$$

С другой стороны, нам известно также (см. § 3), что собственная циклическая частота колебаний в идеальном ($R = 0$) колебательном контуре равна: $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

Сравнивая два последних выражения, можно сделать вывод, что *резонанс в электрической цепи возникает, когда частота внешнего периодического напряжения будет равна собственной частоте контура* $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$ (рис. 12.1). Чем меньше активное сопротивление, тем больше амплитуда тока. На рисунке 12.1 активные сопротивления $R_1 < R_2 < R_3$. Если активное сопротивление цепи бесконечно мало $R \rightarrow 0$, то амплитуда тока неограниченно возрастает $I_m \rightarrow \infty$.

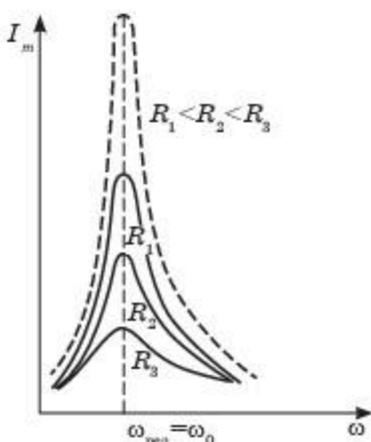


Рис. 12.1. Резонансные кривые в последовательной цепи переменного тока

Как было отмечено выше, рассмотренный нами случай, когда активное, индуктивное и емкостное сопротивления включены последовательно, называется *резонансом напряжений*, или *последовательным резонансом*. Дело в том, что в этом случае при резонансе одновременно с ростом силы тока резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Как говорилось выше, при резонансной частоте в любой момент времени $-u_C = u_L$. Подставив в это уравнение значения резонансной частоты, получим:

$$\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

В условиях резонанса имеем: $U_{L_{рез}} = U_{C_{рез}}$;

$$U_{L_{рез}} = I_m X_{L_{рез}}; X_{L_{рез}} = L\omega_{рез} = \frac{L}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}}; U_{L_{рез}} = \frac{U_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Итак, $U_{L_{рез}} = U_{C_{рез}} = I_m X_{C_{рез}} = \frac{U_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Для обычных колебательных контуров $\frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} > 1$, поэтому напряжение как на конденсаторе, так и на катушке превышает напряжение, приложенное к цепи, причем тем больше, чем меньше R . Вообще, о резонансе имеет смысл говорить лишь при достаточно малых R , как видно на рисунке 12.1, при больших R резонанс практически не наблюдается.

Применение явления резонанса. Явление резонанса напряжений используется для усиления колебания напряжения какой-либо определенной частоты. Резонансное усиление напряжения происходит в очень узком интервале вблизи резонансной частоты. Это дает возможность выделить из многих сигналов одно колебание определенной частоты, например, на радиоприемнике (рис. 12.2), и настроиться на нужную длину волны. Входная цепь любого радиоприемника представляет собой регулируемый колебательный контур. Его резонансная частота, изменяемая с помощью регулировки емкости конденсатора, совпадает с частотой сигнала радиостанции, которую необходимо принять.

Явление резонанса напряжений используют в так называемых электрических фильтрах, например, если необходимо устранить из передаваемого сигнала составляющую определенной частоты, параллельно приемнику ставят цепочку из соединенных последовательно конденсатора и катушки индуктивности. Тогда ток резонансной частоты этой LC -цепочки замыкается через нее, и не попадает к приемнику (нагрузке). А составляющие сигнала, частота которых не соответствует резонансной, будут проходить через приемник (рис. 12.3).

Вообще резонанс напряжений в электротехнике является нежелательным явлением, поскольку он вызывает перенапряжения и выход из строя оборудования. Резонанс напряжений



Рис. 12.2. Радиоприемник

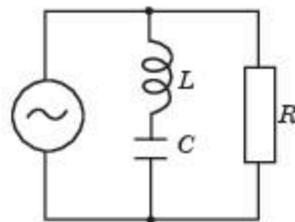


Рис. 12.3. Электрический фильтр

необходимо учитывать при расчете изоляции электрических линий, содержащих конденсаторы и катушки, так, чтобы не было пробоя.



1. В чем заключается явление резонанса?
2. Чему равна резонансная частота?
3. Чему равны напряжения на активном, индуктивном и емкостном сопротивлениях при резонансе?
4. Где используется резонанс напряжений? Назовите характерные признаки резонанса напряжений.



Начертите векторную диаграмму при резонансе напряжений. Обсудите, сделайте выводы.

Пример решения задачи

Резонансная частота колебательного контура, состоящего из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, равна $\nu_{\text{рез}} = 1$ кГц. Определите индуктивность катушки, если полное сопротивление, оказываемое этим контуром переменному току частотой $\nu = 4$ кГц, равно $R_T = 10^3$ Ом, а активное сопротивление катушки $R = 10$ Ом.

Дано:

$$\nu_{\text{рез}} = 1 \text{ кГц} = 1 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

$$\nu = 4 \text{ кГц} = 4 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

$$R_T = 10^3 \text{ Ом}$$

$$R = 10 \text{ Ом}$$

$$L - ?$$

Решение. Запишем формулы резонансной частоты и полного сопротивления контура. Учитывая, что $\omega = 2\pi\nu$, имеем:

$$2\pi\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad R_T = \sqrt{R^2 + \left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}\right)^2}.$$

Возведем эти уравнения в квадрат, из первого найдем емкость $C = \frac{1}{4\pi^2\nu_{\text{рез}}^2 L}$ и подставим во второе уравнение. После преобразования получим: $R_T^2 - R^2 = \frac{4\pi^2 L^2}{\nu^2} (\nu^2 - \nu_{\text{рез}}^2)^2$, отсюда $L = \frac{\nu \sqrt{R_T^2 - R^2}}{2\pi(\nu^2 - \nu_{\text{рез}}^2)}$;

$$L = \frac{10^3 \text{ Гц} \sqrt{(10^6 - 10^2) \text{ Ом}^2}}{6,28(16 \cdot 10^6 - 10^6) \text{ Гц}^2} = 0,01 \text{ Гн}$$

$$L = 10 \text{ мГн.}$$

Ответ: $L = 10$ мГн.



Упражнение 9

1. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 200$ мГн и конденсатора емкостью $C = 5 \cdot 10^{-5}$ Ф. Определите резонансную частоту.

Ответ: ≈ 50 Гц.

2. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью $L = 10^{-6}$ Гн и плоского воздушного конденсатора, площадь каждой пластины которого $S = 100$ см², резонирует на частоте $\nu_{\text{рез}} = 2 \cdot 10^7$ Гц. Определите расстояние между пластинами конденсатора.

Ответ: 0,14 см.

*3. Резонанс в колебательном контуре, содержащем конденсатор емкостью $C_1 = 1$ мкФ, наступает при частоте $\nu_1 = 400$ Гц. Если параллельно этому конденсатору подключить другой конденсатор, резонанс наступит при частоте $\nu_2 = 100$ Гц. Определите емкость второго конденсатора.

Ответ: 15 мкФ.

*4. В цепь переменного тока с напряжением $U = 110$ В и частотой $\nu = 50$ Гц последовательно включены катушка индуктивностью $L = 0,5$ Гн, активное сопротивление $R = 40$ Ом и конденсатор переменной емкости. При какой емкости конденсатора наступает резонанс напряжений? Определите силу тока в цепи при резонансе и соответствующее напряжение на конденсаторе.

Ответ: 20,3 мкФ; 2,75 А; 431 В.

§ 13. Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор



Ключевые понятия:

- ✓ электрические станции
- ✓ тепловые электростанции
- ✓ гидроэлектростанции
- ✓ линии электропередач
- ✓ потери энергии на линии
- ✓ трансформаторы

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основами производства и передачи электроэнергии и экономическими преимуществами переменного напряжения при передаче электрической энергии;
- изучите принцип работы и устройство трансформатора.

Производство и передача электрической энергии. Современную жизнь невозможно представить без электричества. Без преувеличения можно сказать, что изобретение электричества и использование электрической энергии было громадным скачком вперед в развитии человеческой цивилизации. Преимущества электрической энергии перед всеми другими видами энергии неоспоримы. Ее можно передавать по

проводам на огромные расстояния со сравнительно малыми потерями. С помощью сравнительно простых устройств электрическую энергию можно преобразовывать в любые другие формы энергии.

Это вы знаете

Генератором тока называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую. Самыми распространенными являются электромеханические индукционные генераторы переменного тока, работа которых основана на явлении электромагнитной индукции.

Электрическая энергия вырабатывается индукционными генераторами переменного тока на электрических станциях различного типа, которые строятся вблизи запасов угля и нефти (тепловые электростанции) или рек (гидроэлектростанции). На тепловых электростанциях тепловая энергия топлива (например, угля) преобразуется в электрическую. Струя нагретого пара под высоким давлением вращает ротор паровой турбины, вместе с ним вращается ротор генератора, установленный на одной оси с паровой турбиной. На гидроэлектростанциях в электрическую энергию преобразуется механическая энергия воды. Русло реки перегораживают плотиной и поднимают уровень воды. Поток воды, падающий с высоты на лопатки гидравлической турбины, вращает ее вместе с ротором генератора.

В настоящее время значительная доля вырабатываемой электроэнергии в мире приходится на атомные электростанции. На АЭС внутриатомная энергия, высвобождаемая в результате цепной реакции деления тяжелых ядер, преобразуется в электрическую. (Работу ядерных реакторов, где происходит цепная реакция, мы рассматривали в 9 классе)

Так как электростанции строятся вблизи запасов топлива или воды, возникает необходимость передачи электроэнергии на определенные расстояния до потребителей электрической энергии. Эти расстояния могут быть довольно большими. При этом возрастают потери энергии в линиях электропередачи, так как по закону Джоуля—Ленца количество теплоты, выделяемое в проводах $Q = I^2Rt$, где $R = \rho \frac{l}{S}$ — *сопротивление линии передачи* — определяется заданным расстоянием l .

Как уменьшить потери энергии?

Есть два способа: 1) Можно уменьшить сопротивление проводов электрической линии. Так как расстояние l задано, для этого надо увеличивать сечение проводов S или использовать материалы с малыми значениями удельного сопротивления ρ , например серебро. Ясно, что такие способы не дадут желаемой экономии, так как это непрактично.

2) Можно уменьшать силу тока, но так, чтобы передаваемая мощность осталась прежней. Так как мощность тока определяется произведением силы тока на напряжение, для уменьшения силы тока надо повышать напряжение. Таким образом, проблема передачи электроэнергии связана с трансформацией тока.

Пусть генератор вырабатывает напряжение U_0 , а нагрузка потребляет напряжение U . Тогда $U_0 = U + IZ$, где Z — полное сопротивление линии. Обычно активное сопротивление линии передачи гораздо больше реактивного, поэтому падение напряжения на линии определяется ее активным сопротивлением:

$$U_0 - U = IR.$$

Тогда потери энергии на линии можно рассчитать так:

$$Q = I^2 R t = (U_0 - U) I t. \quad (13.1)$$

При заданной мощности генератора потери энергии на линии обратно пропорциональны напряжению, которое подается на линию.

Рассчитаем потери энергии при данной мощности генератора P в случаях, когда напряжение равно U_1 и U_2 :

$$Q_1 = I_1^2 R t = \frac{P^2}{U_1^2} R t; \quad Q_2 = I_2^2 R t = \frac{P^2}{U_2^2} R t;$$

Их отношение:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U_2^2}{U_1^2}$$

Если напряжение, подаваемое на линию, недостаточно высокое, потери за единицу времени в проводах могут превысить мощность генератора и энергия до потребителя вообще не дойдет.

Потеря мощности в проводах, идущих от электростанции к потребителю при заданной мощности генератора $P = IU \cos \varphi$ равна:

$$\Delta P = I^2 R = \frac{P^2 \cdot R}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{2 \rho l P^2}{U^2 S \cos^2 \varphi} \quad (13.1)$$

Здесь S — площадь поперечного сечения, l — длина, ρ — удельное сопротивление подводящих проводов.

Из всего сказанного ясно, что на линию электропередачи необходимо подавать высокое напряжение. Генераторы переменного тока вырабатывают напряжение, не превышающее 20 кВ. Для дальнейшего повышения напряжения используются так называемые *повышающие трансформаторы* (рис. 13.1). Обычно применяют несколько каскадов повышения напряжения, затем ток подается на линию передачи. На



Рис. 13.1. Повышающий трансформатор

другом конце линии используют *понижающие трансформаторы* и в несколько приемов понижают напряжение. Известно, что наиболее широко в нашей стране используется напряжение 220 В.

Трансформаторы. Трансформатор является не только одной из главных составляющих в системе передачи электроэнергии на расстояние, но и используется во многих различных приборах и аппаратах. В современной технической аппаратуре и технологиях трудно назвать электронное устройство, где бы не использовался трансформатор.

Изменение напряжения переменного тока с одновременным изменением силы тока практически без изменения его мощности называется трансформацией переменного тока.

Прибор, осуществляющий трансформацию переменного тока, называется *трансформатором* (рис. 13.1). Его действие основано на явлении электромагнитной индукции. Датой изобретения трансформатора считается 30 ноября 1876 года, когда русский изобретатель П. Н. Яблочков получил патент на трансформатор с разомкнутым сердечником. Это был стержень с намотанными на него обмотками. В 1884 году в Англии братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсонами был создан первый трансформатор с замкнутым сердечником.

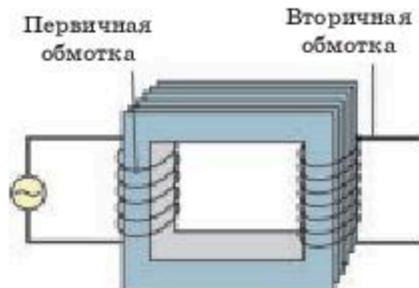


Рис. 13.2. Устройство трансформатора

Трансформатор представляет собой замкнутый стальной сердечник, собранный из изолированных пластин в целях уменьшения токов Фуко (рис. 13.2). Трансформаторная сталь легко перемагничивается с минимальными потерями. На сердечник надеваются две катушки. Одна катушка включается в цепь переменного тока и называется *первичной*.

Ко второй катушке подключают потребителя, т. е. электрические приборы, потребляющие электроэнергию. Она называется *вторичной* (рис. 13.2). Катушки имеют малое активное сопротивление.

Генератор поддерживает в первичной катушке переменное напряжение U_1 . Переменный ток, идущий по первичной катушке, создает в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Он возбуждает в каждом витке ЭДС самоиндукции первичной и такую же ЭДС индукции в каждом витке вторичной катушки. Если число витков первичной катушки n_1 , а вторичной — n_2 , то $\mathcal{E}_1 = en_1$, $\mathcal{E}_2 = en_2$, где e — ЭДС индукции в одном витке любой из катушек. Отсюда:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (13.3)$$

Так как активное сопротивление мало, для первичной катушки можно написать: $U_1 \approx |\mathcal{E}_1| = n_1 e$.

Мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 изменяются синфазно. Поэтому их отношение в формуле (13.3) можно заменить отношением действующих значений \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 этих ЭДС:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (13.4)$$

Ненагруженный трансформатор. Пусть вторичная катушка не замкнута на нагрузку, т.е. трансформатор — на *холостом ходу* (рис. 13.3). В этом случае ток во вторичной обмотке не идет, поэтому приблизительно можно считать, что напряжение на зажимах вторичной катушки $U_2 \approx |\mathcal{E}_2|$.

В отсутствие нагрузки во вторичной цепи расхода энергии нет, а в первичной цепи есть очень малые потери энергии на нагревание подводящих проводов и сердечника за счет тепла Джоуля и перемагничивания, которыми можно пренебречь. Таким образом, при холостом ходе трансформатора, учитывая уравнение (13.3), имеем:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} = k, \quad (13.5)$$

где k — коэффициент трансформации, равный отношению числа витков *первичной* и *вторичной обмоток*. При холостом ходе трансформатора

$k = \frac{U_1}{U_2}$. Если $k > 1$, то $U_1 > U_2$, и трансформатор называется *понижающим*. Если $k < 1$, то $U_1 < U_2$, трансформатор называется *повышающим*. В повышающем трансформаторе число витков в первичной катушке

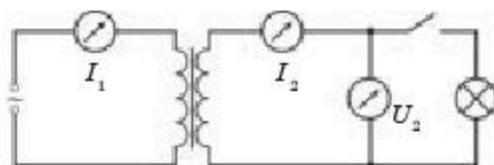


Рис. 13.3. Ненагруженный трансформатор

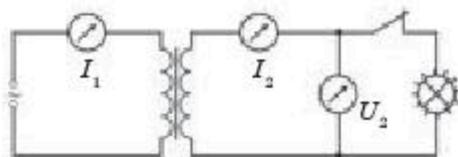


Рис. 13.4. Нагруженный трансформатор

меньше, чем во вторичной, а в понижающем трансформаторе — наоборот.

Нагруженный трансформатор. Включим во вторичную цепь какую-либо нагрузку (рис. 13.4). Во вторичной цепи появится переменный ток i_2 такой же частоты, как и в первичной.

Поэтому во вторичной катушке возникает ЭДС самоиндукции, и немного снижается напряжение на ее концах. По правилу Ленца это можно объяснить так: магнитный поток, созданный индукционным током, *уменьшает внешний магнитный поток*. Но этот магнитный поток пронизывает обе катушки, поэтому его уменьшение приводит к уменьшению ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_1 в первичной катушке, что вызывает увеличение силы тока в первичной цепи при постоянстве U_1 .

Увеличение силы тока в первичной цепи приводит к увеличению магнитного потока, а следовательно, и ЭДС индукции, и силы тока во вторичной цепи, что сопровождается увеличением тока самоиндукции во вторичной цепи и уменьшением магнитного потока. Далее повторяются вышеописанные процессы до тех пор, пока при постоянной нагрузке не установятся определенные магнитный поток, ЭДС индукции во вторичной цепи и сила тока i_1 в первичной цепи.

Теперь трансформатор отбирает от генератора мощность, большую, чем при холостом ходе, на величину мощности потребляемой вторичной цепью. По закону сохранения энергии, если пренебречь малыми потерями, энергия генератора передается посредством *магнитного поля* из первичной цепи во вторичную. Поэтому мощности в первичной и вторичной обмотках равны:

$$I_1 U_1 = I_2 U_2,$$

отсюда:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = k.$$

При повышении напряжения в несколько раз сила тока уменьшается во столько же раз. Коэффициент полезного действия современных трансформаторов $\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$ доходит до 99%, т. е. потери энергии не превышают 1—2%.

Надо отметить, что потери энергии при передаче постоянного тока были бы гораздо меньше, так как при его использовании не было бы потерь на перемагничивание. Но постоянный ток не трансформируется. Вспомним, что работа трансформаторов основана на явлении электромагнитной индукции. Можно трансформировать переменный ток, затем его выпрямить при высоком напряжении и подать на линию передачи, затем опять преобразовать в переменный ток и опять трансформировать

до нужного низкого напряжения. Но возникают трудности преобразования тока, поэтому в настоящее время используют переменный ток.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

В Казахстане трансформаторы выпускают на заводах холдинговой компании "Alageum Electric", которая включает в себя более 30-ти крупных предприятий и заводов, в числе которых — трансформаторные заводы в городах Кентау, Шымкент, Уральск, Алматы и Актау. Старейшим из них является Кентауский завод — крупнейший производитель трансформаторного оборудования в СНГ, в котором первый трансформатор ТМ-180/10 был выпущен 10 июля 1960 года. Он расположен в городе Кентау Туркестанской области.



Результаты полувекового опыта работы Кентауского завода были внедрены в "Уральском трансформаторном заводе", продукция которой на 90% ориентирована на экспорт, в числе которых сухие и масляные трансформаторы на 6, 10, 20 кВ, мощностью до 2500 кВА; комплектные трансформаторные подстанции различного типа исполнения; комплектные распределительные устройства серии КСО, КРУ, КРУН на 10, 20 кВ; блочно-модульные здания различного назначения; низковольтные устройства. Продукцией Алматинского электромеханического завода являются высоковольтное и низковольтное оборудование, комплектные трансформаторные подстанции и многое другое.

В Шымкенте 26 апреля 2019 года прошла презентация нового завода по производству трансформаторного оборудования Asia Trafo. Мощность завода — 120 трансформаторов в год. Благодаря его вводу в эксплуатацию холдинг Alageum Electric закрывает всю линейку трансформаторов, нужную казахстанскому рынку, — от 6 до 500 киловольт. Предполагается, что теперь потребность казахстанского рынка будет обеспечена на 90%. При этом доля местного содержания достигает 65—70%.

Традиционными источниками энергии является органическое топливо — уголь, газ, нефть. Но их запасы в природе ограничены. И рано или поздно наступит день, когда они иссякнут. Кроме того, глобальной проблемой современности становится загрязнение окружающей среды выбросами в атмосферу в процессе сгорания органического топлива. Поэтому в настоящее время очень актуальной становится проблема поиска и разработки альтернативных, т. е. нетрадиционных, возобновляемых источников энергии. Рассмотрим некоторые из них.

Солнечная энергия. В так называемых гелиоустановках как альтернативный источник энергии используется солнечное излучение.

Излучение Солнца можно использовать для нужд теплоснабжения, а также для получения электричества с помощью фотоэлементов. К преимуществам солнечной энергии можно отнести возобновляемость, бесшумность, отсутствие вредных выбросов в атмосферу при переработке солнечного излучения в другие виды энергии.

Недостатками солнечной энергетики является дороговизна солнечных батарей, зависимость интенсивности солнечного излучения от климатических условий, от суточного и сезонного ритма. Кроме того, для строи-

тельства солнечных электростанций необходимы очень большие площади, к тому же эти площади в процессе работы солнечных батарей нагреваются, что может привести к климатическим изменениям местности.

Ветряная энергия. Другим перспективным источником энергии является ветер. В ветрогенераторах сила ветра используется для того, чтобы привести в движение ветряное колесо. Это вращение в свою очередь передается ротору электрического генератора. Преимуществом ветряного генератора является, прежде всего, то, что в ветряных местах, ветер можно считать неисчерпаемым источником энергии. Кроме того, ветрогенераторы не загрязняют атмосферу вредными выбросами. К недостаткам устройств по производству ветряной энергии можно отнести непостоянство силы ветра и малую мощность единичного ветрогенератора. Также ветрогенераторы производят много шума, поэтому их стараются строить вдали от мест проживания людей.

К альтернативным источникам энергии можно также отнести тепловую энергию воды, где используется разность температуры слоев воды в океане, энергию рек, геотермальную энергию.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!



Проблеме развития альтернативных источников энергии была посвящена Международная специализированная выставка ЭКСПО-2017, которая прошла в г. Нур-Султане с 10 июня по 10 сентября 2017 года.

Тема выставки — «Энергия будущего». В ЭКСПО-2017 приняли участие 115 государств и 22 международных организаций. Выставку посетили порядка 4 млн. человек, из которых 0,5 млн. приехали из 187 стран.



1. *Расскажите, где и как производится электрическая энергия?*
2. *Расскажите о способах уменьшения потерь энергии на линии передачи электроэнергии.*
3. *Почему используются высоковольтные линии передачи электроэнергии?*
4. *Начертите схему передачи электроэнергии.*
5. *В чем преимущества и недостатки гидроэлектростанций перед АЭС и ТЭЦ?*
6. *В каких целях используется трансформатор?*
7. *Объясните принцип действия трансформатора.*
8. *Что такое коэффициент трансформации?*
9. *Какой трансформатор называют понижающим; повышающим?*
10. *Почему сердечник трансформатора изготавливают из изолированных пластин?*



Соберите информацию об ЭКСПО-2017 и подготовьте презентацию. Посетили ли вы лично эту выставку, если да, расскажите о своих впечатлениях.

Примеры решения задач

1. Линия электропередачи длиной $l_0 = 35$ км находится под напряжением $U = 140$ кВ и рассчитана на мощность $P = 7$ МВт. Потери в линии не должны превышать 5% переданной энергии. Определите площадь сечения медных проводов для такой двухпроводной линии, $\cos \varphi \approx 1$.

Дано:

$$l_0 = 35 \text{ км} = 35 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$U = 140 \text{ кВ} = 14 \cdot 10^4 \text{ В}$$

$$P = 7 \text{ МВт} = 7 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

$$\Delta P = 0,05 P$$

$$\cos \varphi \approx 1$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$S = ?$$

Решение. Мощность на входе линии электропередачи должна быть больше расчетной мощности на ΔP — потери мощности в самой линии:

$$P_{\text{вх}} - P = \Delta P. \quad (1)$$

Учтем, что $P_{\text{вх}} = IU$; $\Delta P = I^2 R$.

Кроме того, по условию задачи $\Delta P = 0,05P$.

Тогда, подставив эти значения в (1), получим:

$$\sqrt{\frac{\Delta P}{R}} U = P + 0,05P.$$

$$\text{Отсюда } P = \frac{\Delta P \cdot U^2}{(1,05)^2 \cdot R} = \frac{0,05 U^2}{(1,05)^2 R}.$$

Длина двухпроводной линии $l = 2l_0$. Теперь из формулы $R = \rho \frac{l}{S}$ определим искомую площадь сечения медных проводов:

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{2\rho l_0 \cdot (1,05)^2 P}{0,05 U^2}.$$

$$S = \frac{2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 35 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot (1,05)^2 \cdot 7 \cdot 10^6 \text{ Вт}}{0,05 \cdot (140)^2 \cdot 10^6 \text{ В}^2} = 0,937 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = 9,37 \text{ мм}^2;$$

Ответ: 9,37 мм².

2. Первичная обмотка трансформатора для питания цепи радиоприемника имеет $n_1 = 12\,000$ витков и включена в сеть переменного тока с напряжением $U_1 = 120$ В. Какое число витков должна иметь вторичная обмотка, если ее сопротивление $R_2 = 0,5$ Ом? Напряжение в цепи радиоприемника $U_p = 3,5$ В при силе тока $I = 1$ А.

Дано:

$$n_1 = 12\,000$$

$$U_1 = 120 \text{ В}$$

$$R_2 = 0,5 \text{ Ом}$$

$$I = 1 \text{ А}$$

$$U_p = 3,5 \text{ В}$$

$$n_2 = ?$$

Решение. Напряжение во вторичной обмотке нагруженного трансформатора равно $U_2 = U_p + IR_2$,

где U_p — напряжение на нагрузке. Тогда из соотношения:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_p + IR_2}$$

имеем:

$$n_2 = n_1 \frac{UP + IR_2}{U_1} = 12000 \frac{3,5B + 1A \cdot 0,5\text{Ом}}{120B} = 400$$

Ответ: $n_2 = 400$ витков.**Упражнение 10**

1. Определите потери мощности при передаче электроэнергии на $l = 40$ км по алюминиевым проводам диаметром $d = 5$ мм. Линия находится под напряжением $U = 35$ кВ, расчетная мощность $P = 1,5$ МВт, $\cos \varphi = 0,87$.
Ответ: 26%.
2. Нагрузка, потребляющая мощность $P = 1$ МВт, находится на расстоянии $l = 75$ км от электростанции. Какова должна быть мощность на входе в линию электропередачи, если площадь поперечного сечения медных проводов $S = 16$ мм²? Напряжение на линии 40 кВ, $\cos \varphi = 0,63$.
Ответ: 2 МВт.
3. На какое расстояние можно передать мощность $P = 200$ МВт с потерями не более 10% по медным проводам площадью поперечного сечения $S = 15$ мм²? Линия находится под напряжением $U = 350$ кВ, $\cos \varphi = 0,87$.
Ответ: 16,7 км.
4. Сила тока в первичной обмотке трансформатора $I_1 = 0,5$ А, напряжение на ее концах $U_1 = 220$ В. Сила тока во вторичной обмотке $I_2 = 11$ А, напряжение на ее концах $U_2 = 9,5$ В. Определите КПД трансформатора.
Ответ: 95%.
5. Сила тока в первичной обмотке трансформатора $I_1 = 10$ А, напряжение на ее концах $U_1 = 110$ В. Определите силу тока во вторичной обмотке, если напряжение на ее концах $U_2 = 1000$ В.
Ответ: 1,1 А.
6. В первичной обмотке повышающего трансформатора $n_1 = 80$ витков, а во вторичной $n_2 = 1280$ витков. Напряжение на концах первичной обмотки $U_1 = 120$ В, а сила тока во вторичной обмотке $I_2 = 0,25$ А. Определите полезную мощность трансформатора.
Ответ: 480 Вт.
7. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 8$ включена в сеть с напряжением $U_1 = 220$ В. Сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 2$ Ом, сила тока в ней $I_2 = 3$ А. Пренебрегая потерями в первичной обмотке, определите напряжение на зажимах вторичной обмотки.
Ответ: 21,5 В.
8. Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 5$ включен в сеть с напряжением $U_1 = 110$ В. Определите силу тока во вторичной обмотке, если ее сопротивление $R_2 = 1,2$ Ом, а сопротивление полезной нагрузки $R = 1$ Ом.
Ответ: 10А.

- *9. Сила тока холостого хода в первичной обмотке трансформатора, питаемого от сети переменного тока с частотой $\nu = 50$ Гц и напряжением $U_1 = 220$ В, равна $I_1 = 0,2$ А. Активное сопротивление первичной обмотки $R_1 = 100$ Ом. Определите индуктивность первичной обмотки.

Ответ: 3,8 Гн.

§ 14. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и в мире



Ключевые понятия:

- ✓ потребление энергии
- ✓ энергетические ресурсы
- ✓ установленная мощность электростанций
- ✓ электроснабжение
- ✓ электрические сети

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основными источниками электроэнергии в Казахстане и в мире.



С развитием общества потребление энергии растет все более быстрыми темпами. Из всех видов потребляемой энергии основную роль играет электрическая энергия. Это обусловлено возможностью преобразования ее во все другие виды энергии без существенных потерь и передачи ее на большие расстояния.

Казахстан обладает крупными запасами энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь, уран) и является энергетической державой. Около 70% электроэнергии в Казахстане вырабатывается из угля, 14,6% — из гидроресурсов, 10,6% — из газа и 4,8% — из нефти.

Рассмотрим основные типы электрических станций Казахстана:

1) ГРЭС — исторически получила свое название от слов государственная районная электростанция, в настоящее время потеряла первоначальный смысл “районная”, на самом деле это мощная тепловая конденсационная электростанция (КЭС), работающая в объединенной энергосистеме страны. Принцип работы ГРЭС основан на использовании сжатого и нагретого до высокой температуры (примерно до 540°C) пара. Нагретый пар под высоким давлением по трубопроводам подается в паровую турбину, где он расширяется до очень низкого давления, при этом вращает ротор турбины. В свою очередь турбина приводит в движение ротор электрогенератора.

2) ТЭЦ — теплоэлектроцентраль. Это тепловая электростанция, в которой после производства электрической энергии часть тепловой энергии пара используется для обеспечения горячего водоснабжения и отопления жилых помещений и промышленных объектов.

3) ГЭС — электростанция, в которой источником энергии является водный массив, поднятый на определенную высоту. Для этого в руслах подходящих рек строят плотины и водохранилища. Напор воды, падающей с высоты на лопасти гидротурбины, приводит в действие генераторы. Таким образом, в ГЭС потенциальная энергия воды превращается в электрическую.

В настоящее время производство электрической энергии в Казахстане осуществляют 128 электрических станций различных типов. По состоянию на 01.01.2018 г. общая установленная мощность электростанций Казахстана составляла 21 672,9 МВт, располагаемая мощность — 18 791,4 МВт. По типу электростанций выработка электроэнергии распределяется следующим образом: ГРЭС (КЭС) — 48,9%; ТЭЦ — 36,6%; ГЭС 12,3%. Остальной небольшой процент приходится на долю нетрадиционных источников энергии.



Рис. 14.1. Экибастузская ГРЭС-1



Рис. 14.2. Шульбинская ГЭС



Рис. 14.3. Усть-Каменогорская ГЭС

Основными потребителями электроэнергии в Казахстане являются: промышленность — 68,7%, бытовое потребление населения — 9,3%, сектор услуг — 8%, транспорт — 5,6%, сельское хозяйство — 1,2%. Электрические станции разделяются на электростанции национального значения, электростанции промышленного значения и электростанции регионального значения.

К электрическим станциям национального значения относятся крупные тепловые электрические станции, обеспечивающие выработку и продажу электроэнергии потребителям на оптовом рынке электрической энергии Республики Казахстан, такие как: Экибастузская ГРЭС-1 (рис. 14.1); Экибастузская ГРЭС-2; ГРЭС «Корпорация Казахмыс»; Жамбылская ГРЭС и т. д., а также гидравлические электростанции большой мощности: Бухтарминская ГЭС, Шульбинская ГЭС (рис. 14.2), Усть-Каменогорская ГЭС (рис. 14.3).

К электростанциям промышленного значения относятся ТЭЦ с комбинированным производством электрической и тепловой энергии, которые служат для электро-теплоснабжения крупных промышленных предприятий и близлежащих населенных пунктов. К ним относятся: ТЭЦ-3 ТОО «Караганда Энергоцентр»; ТЭЦ ПВС, ТЭЦ-2 АО «Арселор Миттал Темиртау»; ТЭЦ АО «СГПО» ERG, «Евразийская группа»; Балхашская ТЭЦ, Жезказганская ТЭЦ ТОО «Kazakhstan energy»; ТЭЦ-1 АО «Алюминий Казахстана» ERG, «Евразийская группа» и другие.

Электростанции регионального значения — это ТЭЦ, интегрированные с территориями, которые осуществляют реализацию электрической энергии и теплоснабжение близлежащих городов.

Электрические сети Республики Казахстан представляют собой совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их линий электропередачи, напряжением 0,4—1150 кВ, предназначенных для передачи и (или) распределения электрической энергии.

Линии электропередачи и распределительные сети Казахстана состоят из трех частей: две на севере и одна на юге. На севере она соединена с Единой энергетической системой России, на юге — с Объединенной энергетической системой Средней Азии. Эти системы соединяются между собой одной линией. В настоящее время ведется строительство второй линии, соединяющей Северную и Южную энергосистемы и рассматривается возможность строительства линии, соединяющей Западную энергосистему с Северной.

Системообразующей сетью в Республике Казахстан является национальная электрическая сеть (НЭС), которая обеспечивает электрические связи между регионами республики и энергосистемами сопредельных государств (Российской Федерации, Республики Кыргызстан и Республики Узбекистан), а также выдачу электрической энергии электрическими станциями и ее передачу оптовым потребителям. НЭС находится на балансе Казахстанской компании по управлению электрическими сетями АО «KEGOC».

Сектор электроснабжения рынка электрической энергии Республики Казахстан состоит из энергоснабжающих организаций (ЭСО), которые осуществляют покупку электрической энергии у энергопроизводящих организаций или на централизованных торгах и последующую ее продажу конечным розничным потребителям.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Самая первая в мире электростанция была построена в 1882 г. в Нью-Йорке. На ней были установлены несколько генераторов Эдисона общей мощностью свыше 500 кВт. Двигатели приводились в движение паром из паровых котлов, сжигающих уголь. Напряжение регулировалось автоматически, роторы двигателя и генератора были соединены напрямую. Уголь в котел подавался механически, зола и шлак также автоматически удалялись. Станция снабжала электроэнергией целый район Нью-Йорка площадью около 2,5 квадратных километров.

Первые электростанции вырабатывали ток крайне низкого по сегодняшним меркам напряжения — около 110 В. Как мы знаем, чем ниже напряжение, тем выше сила тока, и тем больше потери энергии в электрических проводах, по которым этот ток протекает. Поэтому в то время о передаче электроэнергии на дальние расстояния не было и речи.

Это обстоятельство заставляло строить первые электростанции в центре городов — то есть в месте, наименее приспособленном для нового строительства. Дорогая земля, проблемы с подвозом топлива и отвозом отходов, проблемы с водоснабжением, недостаток места заставляли строить электростанции многоэтажными (например в США) или располагать их в баржах (например, в Петербурге)

В Казахстане, как и во всем мире, в последние годы активно внедряются в эксплуатацию возобновляемые источники электрической энергии, строятся ветряные и солнечные электростанции.

В августе 2015 года была введена в эксплуатацию первая в Казахстане ветровая электростанция (ВЭС) промышленного типа мощностью 0,05 МВт. Она расположена в Акмолинской области близ города Ерейментау (рис. 14.4).

Проект был осуществлен ТОО “Первая ветровая электрическая станция”, дочерней компанией АО “Самрук-Энерго”. В настоящее время мощность Ерейментауской ВЭС составляет 45 МВт, она состоит из 22 ветроустановок, мощность каждой из которых равна 2,05 МВт, и новой собственной подстанции 220/35кВ. ВЭС производит 172,2 млн. кВтч электроэнергии в год без использования органического топлива и выбросов углекислого газа. Вся вырабатываемая электроэнергия поступает в Национальную электрическую сеть Казахстана. Надо отметить, что за счет энергии, выработанной Ерейментауской ВЭС, электроснабжением были обеспечены объекты Международной специализированной выставки “ЭКСПО-2017”. Существенный вклад в ветроэнергетику вносит Кордайская ВЭС мощностью 21 МВт, находящаяся в Кордайском районе Жамбылской области. На ней установлен 21 одинаковый ветрогенератор фирмы Nordex с высотой башни 60 м и диаметром ротора 54 м. Здесь



Рис. 14.4. Ерейментауская ВЭС

же была построена высоковольтная подстанция 110/10 кВ “ВЭС Кордай” с двумя трансформаторами мощностью по 16 МВ · А и линия электропередачи напряжением 110 кВ, длиной 2,4 км для связи с энергосистемой. До конца 2019 года планируется ввести в эксплуатацию еще три объекта на 57 МВт в Мангистауской и Акмолинской областях. Ожидается, что к концу 2019 года будут функционировать 18 ВЭС общей мощностью 285 МВт.

Активно развивается в нашей стране также использование энергии солнца. В Казахстане потенциал солнечной энергии довольно велик, так длительность солнечного света в году в среднем составляет 2500 часов. На юге страны в среднем 300 дней в году являются солнечными. Одна из первых солнечных электростанций нашей страны — СЭС “Отар”, первая очередь которой общей мощностью 7 МВт введена в эксплуатацию в конце 2012 года. 20 декабря 2013 года был дан старт работе Капшагайской СЭС, ее проектная мощность составляет 150 МВт (рис. 14.5). Активное строительство солнечных электростанций ведется на юге страны: в Сарыагашском (мощностью 20 МВт), Мактааральском (4,95 МВт) и Сузакском (50 МВт) районах Туркестанской области, а также в городах Арысь (14 МВт) и Кентау (50 МВт). К 2025 году в регионе должно быть 13 ВИЭ-проектов общей мощностью 148,8 МВт.



Рис. 14.5. Капшагайская СЭС

В настоящее время доля возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе составляет немногим более 1 %, планируется достигнуть показателя 3 % к 2020 году, 10 % к 2030 году и 50 % к 2050 году.

Производство и потребление электроэнергии в мире. Спрос на электроэнергию в мире возрастает из года в год. Потребление энергии в мировом масштабе изучают и ведут учет такие учреждения, как Международное энергетическое агентство (IEA), Energy Information Administration (EIA). По некоторым прогнозам к 2035 году новыми потребителями электроэнергии станут 1,6 млрд. человек за счет прироста населения, еще 2,7 млрд. человек, не имеющих в настоящее время доступ к электроэнергии. В результате к тому времени потребление электроэнергии возрастет в мире на 40—50 %. По расчетам некоторых международных организаций, на долю промышленности приходится 37 % от всей произведенной электроэнергии, тогда как транспорт потребляет около 20 %.

На освещение, отопление жилых помещений и бытовые электроприборы используется 11 %, на коммерческие нужды 5 % от общего количества произведенной энергии. Оставшиеся 27 % мирового потребления энергии теряются при производстве и передаче электроэнергии.

Основным источником энергии для электростанций остается органическое топливо, что порождает глобальную проблему загрязнения окружающей среды. По данным МАЭ (Международная Академия Экологии) в 2013 году мировые выбросы углекислого газа от сжигания ископаемого топлива составили 32 гигатонны. Если учитывать прогноз на прирост потребления электроэнергии к 2035 году, то необходимы кардинальные меры по предотвращению экологической катастрофы.

Для этого в настоящее время международное сообщество прилагает большие усилия. Например, быстрыми темпами растет потребление природного газа вместо угля, ожидается что к 2040 году около 60% электроэнергии будет производиться из возобновляемых источников.



- 1. Какие основные типы электростанций действуют в настоящее время на земле Казахстана? Расскажите о принципах их работы.
- 2. Какие электростанции имеют статус национального значения? Приведите примеры.
- 3. Назовите электростанции промышленного значения.
- 4. Что означает НЭС?
- 5. Расскажите о тенденциях мирового потребления электроэнергии.
- *6. Как связаны рост производства и потребления электроэнергии с проблемой загрязнения окружающей среды?



Напишите рассказ "Потребление электроэнергии в моей семье". Изучите технические паспорта всех осветительных и бытовых приборов в вашей квартире. Выясните приблизительно, сколько времени в сутки вы пользуетесь каждым прибором. Рассчитайте, какое количество электроэнергии в месяц использует ваша семья. Проверьте по квитанции оплаты расход электроэнергии за такой же период времени и сравните с вашими расчетами. Насколько разнятся эти значения? Сделайте выводы.

Самое важное в главе 3

- **Генератором тока** называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

- Электрический ток, который с течением времени периодически изменяется как по величине, так и по направлению, называется *переменным*. Колебания напряжения и силы переменного тока в цепи происходят всегда с одинаковой частотой, но их фазовые соотношения зависят от вида нагрузки. На участке цепи с активным сопротивлением колебания напряжения и силы тока происходят синфазно, тогда как на участке цепи, содержащем конденсатор, колебания силы тока опережают, а на участке с катушкой индуктивности отстают по фазе колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$.

- Закон Ома для переменного тока: $I = \frac{U}{Z}$,

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

- Мощность в цепи переменного тока: $P = IU \cos\varphi$.

- Резонанс в электрической цепи возникает, когда частота внешнего периодического напряжения будет равна собственной частоте контура $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$.

- **Трансформатор** — это устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения без изменения частоты и практически без потерь мощности.

Раздел II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Глава 4. ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

§ 15. Упругие механические волны



Ключевые понятия:

- ✓ поперечная волна
- ✓ продольная волна
- ✓ бегущая волна

На этом уроке вы:

- познакомитесь с характером волны, распространяющейся в упругой среде, и уравнением энергии бегущей волны.



От камня, брошенного в озеро, образуются расходящиеся круговые волны. Если вы подергаете вверх и вниз за конец шнура, проложенного прямо по столу, то по нему тоже побегут волны. Волны на воде и волны, бегущие по шнуру, — это два наглядных примера волнового движения. Звук также распространяется в виде волны, и свет представляет собой электромагнитные волны. Элементарные частицы вещества, такие, как электроны, в некоторых отношениях тоже подобны волнам. Таким образом, изучение волновых явлений очень важно, поскольку они встречаются во многих областях физики. В настоящей главе мы сосредоточим внимание на изучении механических волн, т. е. волн, которые распространяются только в упругой среде (рис. 15.1).

Колебательное движение может быть перенесено из одной точки твердой, жидкой и газообразной упругой среды в другую. Если в любой точке упругой среды возбудить колебания ее частиц, то от действия сил упругости между частицами эти колебания распространяются на частицы в этой среде с определенной скоростью друг за другом.

Процесс распространения колебаний по всему телу называется волновым движением. Волной называют колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

При распространении колебаний происходит передача энергии в окружающую среду, поэтому для существования непрерывной волны нужен источник колебаний, находящийся в данной упругой среде. Особенность волнового движения состоит в том, что в нем происходит перенос из одной области пространства в другую не частиц, а энергии (переносится как бы состояние частиц). Если в со-



Рис. 15.1

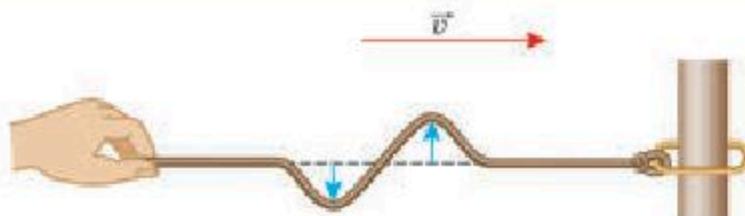


Рис. 15.2

стоянии колебательного движения находится одна частица среды, то в точно такое же движение придут и связанные с ней другие частицы этой среды, но с некоторым запаздыванием во времени.

В зависимости от природы возникновения волны делятся на *механические* и *электромагнитные*. *Механические волны представляют собой процесс распространения механических колебаний в упругой среде, а электромагнитные волны — чередующиеся переменные электрические и магнитные поля, связанные друг с другом.*

Кроме того, в зависимости от соотношения направления колебаний точек среды и направления распространения волны различают поперечные и продольные волны.

Поперечные волны — это волны, в которых частицы среды совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Упругие поперечные волны могут наблюдаться только в твердых средах или на границе двух сред различной упругости (например, на поверхности воды). Происходит это потому,

что в поперечной волне происходит сдвиг слоев относительно друг друга, а упругие силы при сдвиге возникают только в твердых телах (рис. 15.2).

Рассмотрим подробнее процесс распространения поперечных волн (рис. 15.3). На горизонтальных линиях будем откладывать расстояние от начальной точки O , а в направлении, перпендикулярном к ней, y — смещение частиц для нескольких моментов времени, разделенных интервалом в четверть периода волны. В начальный период времени ($t = 0$) все частицы среды находятся в равновесии, частица, находящаяся в точке O , только что получила ускорение, направленное вверх. Отклоняясь от положения равновесия, частица увлекает за собой соседние. Че-

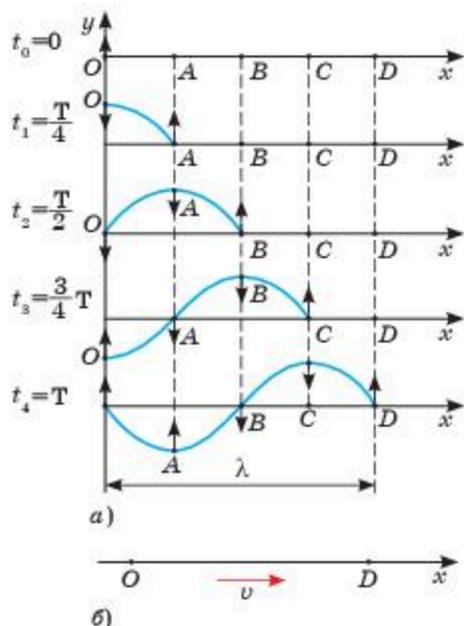


Рис. 15.3

рез четверть периода $t = \frac{T}{4}$ частица, находящаяся в точке O , достигнет максимального отклонения, а частица A , отстоящая от нее на расстоянии $x = v\frac{T}{4}$, только еще получит ускорение, направленное вверх. В момент $t = \frac{T}{2}$ первая частица вернется в положение равновесия O , имея ускорение, направленное вниз, частица A , достигнет максимального смещения вверх, а частица B , отстоящая от O на расстоянии $x = v\frac{T}{2}$, лишь начнет движение вверх. Спустя время $t = \frac{3T}{4}$ частица O достигнет наибольшего смещения книзу, частица A пройдет положение равновесия, двигаясь вниз, частица B переместится в крайнее верхнее положение, частица C , находящаяся на расстоянии $x = v\frac{3T}{4}$ от точки O , начнет двигаться кверху. Наконец, спустя время $t = T$ первая частица вернется в точку O , имея ускорение вверх, точка A достигнет крайнего низшего положения, точка B пройдет линию равновесия, двигаясь вниз, частица C достигнет максимального отклонения вверх и частица D , находящаяся на расстоянии $x = vT$ от точки O , приобретет ускорение вверх. Далее процесс повторяется.

Продольные волны — это волны, в которых частицы совершают колебания по направлению распространения волны. Продольные волны могут распространяться в твердых, жидких и газообразных телах.

Продольная волна возникает, например, в длинной спиральной пружине, висящей горизонтально. Если один конец ее подвергнуть периодическому внешнему воздействию, то по ней побегут волны в виде перемещающихся сгущений и разрежений ее витков (рис. 15.4).

В природе мы можем наблюдать различные механические волны. Это и звуковые волны, и ультразвук, и инфразвук, волны на поверхности воды (они возникают из-за действия силы тяжести и силы поверхностного натяжения), сейсмические волны, переносящие колебания почвы.

Волновая поверхность и волновой фронт. Изучение волнового движения значительно упрощается с введением понятий волнового фронта и волновой поверхности.

Волновая поверхность — геометрическое место точек, имеющих одинаковую фазу колебаний, а **волновой фронт** — это поверхность, отделяющая часть среды, охваченную колебательным процессом от той, что не охвачена колебаниями.



Рис. 15.4

Так, например, фронт волны, отходящий от одиночного вибратора небольших размеров, имеет вид окружности; от плоского удлиненного вибратора — вид прямой линии; от громкоговорителя — форму сферы; от струны — форму цилиндра.

Характеристики волн. Для характеристики волнового движения введены две физические величины — длина волны и скорость ее распространения.

Длина волны λ — это физическая величина, определяемая расстоянием между двумя ближайшими точками волны, совершающими колебания в одинаковых фазах, т. е. это расстояние, которое проходит волна за время, равное одному периоду.

Все точки сферы, образующие фронт волны, колеблются в одинаковой фазе, поэтому скорость, с которой распространяется фронт волны, называется **фазовой скоростью**. Направление скорости всегда перпендикулярно фронту волны. Так как фазовая скорость v в изотропной среде постоянна, то ее можно найти, разделив перемещение фазы волны на время, за которое оно произошло. Поскольку за время T фаза волны перемещается на расстояние λ , то

$$v = \frac{\lambda}{T}. \quad (15.1)$$

Если волны гармонические, то скорость движения волновой поверхности равна скорости распространения волны. Скорость, которую определяет выражение (15.1) является **фазовой скоростью**. Фазовая скорость гармонической волны совпадает со скоростью распространения энергии волны. Скорость волны зависит от вещества, в котором распространяется волна, и типа волны. Так как период и частота колебаний связаны друг с другом соотношением:

$$n = \frac{1}{v}, \quad (15.2),$$

получаем, что фазовую скорость распространения волны можно найти по формуле:

$$v = \lambda \cdot \nu. \quad (15.3)$$

Скорость распространения продольных волн в твердых средах:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (15.4)$$

где E — модуль Юнга, ρ — плотность среды.

Скорость распространения звуковой волны в газе (звук — это продольная волна в упругой среде):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (15.5)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ — отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме, M — молярная масса воздуха.

Уравнение бегущей волны. Пусть синусоидальная волна распространяется вдоль оси Ox . Это может быть поперечная волна в натянутой струне, резиновом шнуре или продольная волна в твердом стержне или в трубе, заполненной жидкостью или газом.

В точке O находится источник колебаний, которые описываются уравнением:

$$y = A \sin \omega t,$$

если начальную фазу колебаний считать равной нулю.

Здесь t — время, отсчитываемое с момента начала колебаний в точке O , y — смещение волны, A — амплитуда волны, ω — циклическая частота. Эта волна показана на рисунке 15.5 сплошной линией. Предположим, что волна движется вправо со скоростью v . Тогда через время $\Delta t = \frac{x}{v}$ каждый участок волны сместится вправо на расстояние $v \cdot \Delta t$, на рисунке 15.5 это изображено штриховой линией. Тогда смещение произвольной точки среды с координатой x будет равно:

$$y = A \sin \omega(t - \Delta t) = A \sin \omega(t - \frac{x}{v}).$$

Колебания в точке x будут происходить с той же амплитудой, но с другой фазой.

Формула $y = A \sin \omega(t - \frac{x}{v})$ есть *уравнение бегущей волны*.

Так как $\omega = \frac{2\pi}{T}$, то

$$y = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi x}{Tv} \right) = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right).$$

Здесь $\frac{2\pi}{\lambda} = k$ назвали *волновым числом*. **Волновое число k** показывает сколько раз длина волны укладывается на отрезке длиной 2π . Тогда уравнение *бегущей волны* имеет следующий вид:

$$y = A \sin(\omega t - kx). \quad (15.6)$$

В случае, когда начальная фаза колебаний в точке O равна не нулю, уравнение бегущей волны запишется так:

$$y = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0).$$

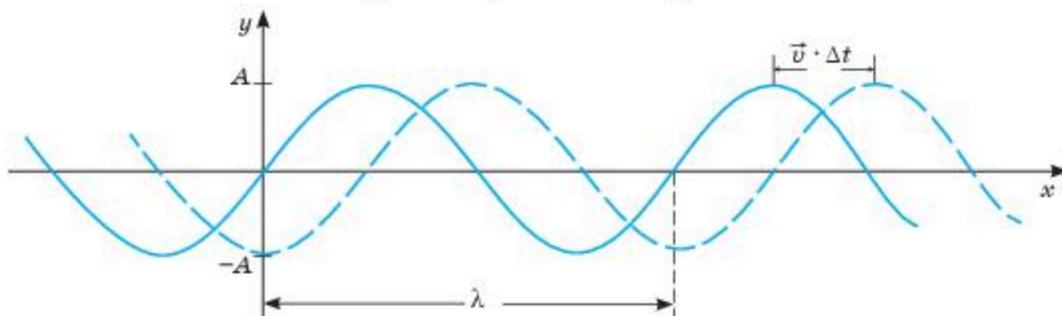


Рис. 15.5

Итак, смещение $y(x; t)$ частиц среды из положения равновесия в синусоидальной волне зависит от координаты x на оси Ox , вдоль которой распространяется волна, и от времени t по закону (15.6).

Энергия бегущей волны. Мы знаем, что при волновом движении происходит перенос энергии от источника колебаний. Рассчитаем энергию бегущей волны. Выделим в упругой среде малый объем ΔV и рассчитаем его кинетическую энергию W_k . Полная энергия волнового движения складывается из кинетической энергии движения волны и ее потенциальной энергии. Кинетическая энергия находится по формуле:

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

Скорость волны мы найдем как производную координаты:

$$v = x' = (A \sin(\omega t - kl))' = A \omega \cos(\omega t - kl).$$

Масса выделенного нами малого участка среды равна $m = \rho \Delta V$, где ρ — плотность среды.

Тогда кинетическая энергия волны будет равна:

$$W_k = \frac{\rho \Delta V A^2 \omega^2}{2} \cos^2(\omega t - kl). \quad (15.7)$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела находится по формуле $W_p = \frac{k \Delta l^2}{2}$, где $k = \frac{ES}{l}$ коэффициент упругости, E — модуль упругости среды, S — площадь поперечного сечения, l — продольная длина выделенного участка среды.

Тогда

$$W_p = \frac{ES \Delta l^2}{2l} \cdot \frac{l}{l} = \frac{ESl \Delta l^2}{2l^2} = \frac{E \Delta V \Delta l^2}{2l^2},$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ называется *относительной деформацией*. В таком случае

$W_p = \frac{E \varepsilon^2}{2} \Delta V$. Так как скорость распространения волны в упругой среде

находится по формуле $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, то отсюда получим, что $E = v^2 \rho$. Тогда энергия волны в нашем случае равна:

$$W_p = \frac{E \varepsilon^2}{2} \Delta V = \frac{\rho v^2 \varepsilon^2}{2} \Delta V.$$

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Солитон — необычная волна. В 1834 году шотландский инженер Джон Скотт наблюдал на одном из каналов как возникла большая одиночная волна, двигавшаяся с сохранением формы и скорости.

Рассел преследовал волну верхом на протяжении нескольких километров, затем, когда высота волны уменьшилась, потерял ее в изгибах канала. Так инженер открыл солитон — (от лат. *solus* — уединенная).

Физическая величина, определяемая энергией, распространяющейся в единице объема, называется **плотностью энергии**:

$$w = \frac{W}{V}.$$

В нашем случае плотность энергии волны будет равна:

$$w = \frac{E\varepsilon^2}{2} \text{ или } w = \frac{\rho v^2 \varepsilon^2}{2}.$$



1. Какое движение называется волновым?
2. Что понимают под волной?
3. В чем состоит главная особенность волнового движения?
4. Как скорость распространения волны связана с ее длиной и частотой колебаний?
5. Как можно отличить продольную волну от поперечной?
6. В каких средах могут возникнуть поперечные и продольные волны?
7. Какая волна называется бегущей? Напишите ее уравнение.
8. Что называется фронтом волны? Как направлена скорость волны по отношению к фронту волны?
9. Что вы понимаете под волновой поверхностью?
10. На какие виды можно подразделить волны в зависимости от того, как выглядит фронт волны?
11. Что такое фазовая скорость?
12. Объясните, почему волны обладают энергией.
13. Морские волны, приближаясь к берегу, увеличивают свою высоту. Почему это происходит?



В 1905 году русский врач Н. С. Кротов, наблюдая за пульсирующими волнами, предложил методику измерения кровяного давления. По этой теме проведите исследование и подготовьте проектную работу.

§ 16. Распространение механических волн. Интерференция механических волн



Ключевые понятия:

- ✓ **наложение волн**
- ✓ **интерференция**
- ✓ **когерентные волны**

На этом уроке вы:

- исследуете интерференцию от двух источников на поверхности воды.



До сих пор мы, изучая волновое движение, рассматривали одну волну. Например, когда в воду брошено несколько камней, то по ее поверхности движется несколько волн. Или когда в помещении разговаривают несколько человек, то отдельные волны будут накладываться друг на друга. При встрече друг с другом волны не оказывают влияния на дальнейшее распространение друг друга. Это свойство присуще только волновому движению, причем совершенно неважно, какие это волны: волны на поверхности воды, звуковые волны, электромагнитные



Рис. 16.1

или световые. Но вот в тех местах, где волны встречаются, происходит их наложение друг на друга. И тогда каждая частица среды, находящаяся на пути этих волн, будет вовлекаться в колебательное движение обеих волн. А движение каждой частицы теперь будет представлять сумму этих колебаний (рис. 16.1).

Следовательно, *наложение волн* есть не что иное, как сложение их колебаний в каждой точке среды, через которую эти волны проходят. Результирующее смещение любой частицы среды представляет собой сумму отдельных смещений, которые возникали бы при прохождении каждой из волн в отсутствие других волн. Получается, что на каждую частицу среды, в которой распространяются волны, действует несколько сил, а их результирующее действие находится как векторная сумма отдельных сил (рис. 16.2).

Явление наложения друг на друга двух или нескольких когерентных волн, при котором в пространстве образуется устойчивая, не изменяющаяся со временем картина распределения амплитуды результирующих колебаний (чередуются их минимумы и максимумы) в различных точках пространства, называется *интерференцией*.

Для того чтобы в пространстве возникала такая картина, необходимо, чтобы налагающиеся волны имели одинаковую частоту и неизменный сдвиг фаз колебаний в каждой точке пространства. Такие волны называются *когерентными*. Они создаются когерентными источниками волн, которые колеблются с одинаковой частотой и постоянным сдвигом фаз.

Для того чтобы выяснить, как происходит интерференция волн, рассмотрим распространение на поверхности воды двух волн, идущих от двух источников M_1 и M_2 в одном направлении (рис. 16.3).

Определим, что будет происходить в некоторой точке на поверхности воды N , где накладываются друг на друга два колебания M_1N и M_2N . Уравнение первой волны выглядит так:

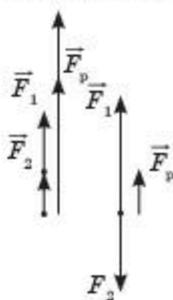


Рис. 16.2

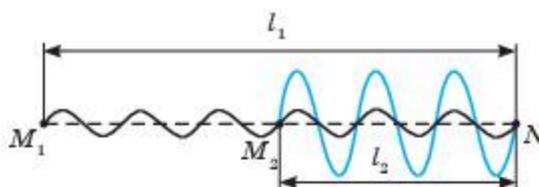


Рис. 16.3

$$y_1 = A_{m_1} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi l_1}{\lambda}\right) \text{ или } y_1 = A_{m_1} \sin\varphi_1,$$

где

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi l_1}{\lambda}. \quad (16.1)$$

Это фаза колебаний первой волны.

Для второй волны уравнение выглядит так:

$$y_2 = A_{m_2} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi l_2}{\lambda}\right) \text{ или } y_2 = A_{m_2} \sin\varphi_2,$$

где

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi l_2}{\lambda}. \quad (16.2)$$

Это фаза колебаний второй волны. В результате их сложения получим гармонические колебания с другой амплитудой, причем если разность фаз колебаний будет равна:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2k\pi \quad (k = 0, 1, 2, 3...), \quad (16.3)$$

то в точке N будет наблюдаться усиление результирующего колебания, т. е. она — *точка максимума*.

Если разность фаз будет равна:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2(k + 1)\pi \quad (k = 0, 1, 2, 3...), \quad (16.4)$$

то это ослабление результирующего колебания, т. е. *точка минимума*. Вычислим разность фаз этих двух колебаний, используя формулы (16.1) и (16.2):

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi l_2}{\lambda} - \frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi l_1}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} (l_1 - l_2). \quad (16.5)$$

Величина $\Delta l = (l_1 - l_2)$ называется *разностью хода волн*. Тогда с учетом формул (16.3) и (16.4) получим условия максимума и минимума при интерференции:

$$\frac{2\pi}{\lambda} (l_1 - l_2) = 2k\pi \text{ или } \Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3...), \quad (16.6)$$

Это условие максимума, а

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (16.7)$$

— это условие минимума.

Отсюда следует, что *если разность хода волн равна четному числу полуволн, то в данной точке происходит усиление колебаний, а если разность хода равна нечетному числу полуволн, то в данной точке происходит ослабление колебаний*.

В результате интерференции волн происходит перераспределение энергии волнового движения в пространстве. В точки минимума энергия не поступает, а точки максимума получают наибольшую долю энергии.

Аналогично можно доказать, что условия минимума и максимума будут справедливы (рис. 16.4), если две когерентные и одинаковые

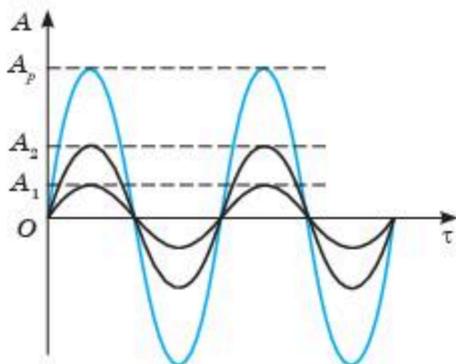


Рис. 16.4

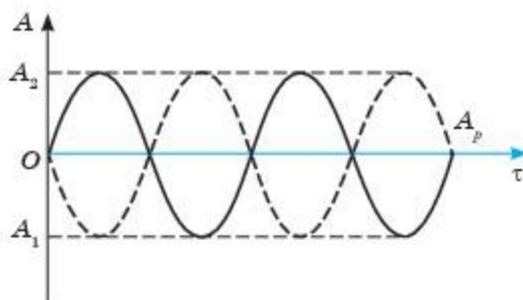


Рис. 16.5

по интенсивности волны распространяются навстречу друг другу, например, происходит наложение падающей и отраженной волн, движущихся вдоль шнура (рис. 16.5). Такая интерференция приводит к образованию *стоячей волны*.



1. Какое явление называется интерференцией? Что необходимо сделать для того, чтобы его наблюдать?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Назовите условия минимума и максимума при интерференции.
4. Происходит ли сложение волн при наложении друг на друга некогерентных волн? Почему?
5. Почему в закрытых и пустых помещениях звук кажется громче, чем на открытом воздухе?
6. Связаны ли раскаты грома с явлением интерференции?
7. Могут ли стойки диаметром 30 см, вбитые в дно перед берегом на расстоянии 2-3 м друг от друга, ослабить набегающую волну?

§ 17. Стоячие волны



Ключевые понятия:

- ✓ стоячая волна
- ✓ пучность
- ✓ узел
- ✓ длина стоячей волны



На этом уроке вы:

- рассмотрите механизм образования стоячих волн, определите узлы и пучности, используя графический метод.

Особым случаем интерференции являются *стоячие волны* — это волны, образующиеся в результате наложения двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами. Направление распространения волн свяжем с направлением оси Ox (рис. 17.1). Начало координат выберем в точке, где встречные волны имеют одинаковые фазы, а время начнем отсчитывать

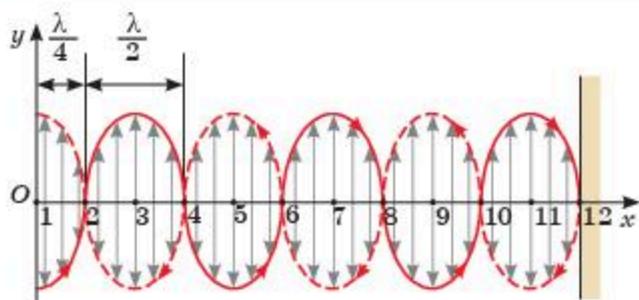


Рис. 17.1

в тот момент, когда их начальные фазы равны нулю. Тогда можно записать уравнение первой волны в виде:

$$y_1 = A \sin(\omega t - kx).$$

Так как $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, то

$$y_1 = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \text{ или}$$

$$y_1 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad (17.1)$$

А у второй волны будет стоять только знак минус перед $\frac{x}{\lambda}$,

$$y_2 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right). \quad (17.2)$$

Смещение точки, которая участвует одновременно в двух колебаниях, равно алгебраической сумме y_1 и y_2 :

$$y = y_1 + y_2,$$

$$\text{то есть } y = A \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \right].$$

Так как $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$, то

$$y = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (17.3)$$

Уравнение (17.3) и есть *уравнение стоячей волны*. Из (17.3) следует, что амплитуда колебаний в стоячей волне

$$A_{\text{ст}} = 2A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \quad (17.4)$$

зависит от положения колеблющейся точки, но не зависит от времени. Поэтому уравнение стоячей волны можно записать так:

$$y = A_1 \sin \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \quad (17.5)$$

В точках, для которых

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = n\pi, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots, \quad (17.6)$$

амплитуда колебаний достигает максимального значения и равна $2A$. Эти точки называются *пучностями* стоячей волны (на рис. 17.1 точки 1,3,5,7...) Из условия (17.6) находим значения координат пучностей:

$$x_{\text{пуч}} = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (17.7)$$

В точках, для которых

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \quad \text{где } n = 0, 1, 2, \dots$$

амплитуда колебаний обращается в нуль. Эти точки называются *узлами* стоячей волны (на рис. 17.1 точки 2,4,6,8...). Точки среды, находящихся в узлах, колебаний не совершают. Координаты узлов имеют следующие значения:

$$x_{\text{узел}} = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (17.8)$$

Из уравнений (17.7) и (17.8) следует, что расстояние между двумя соседними пучностями или между двумя соседними узлами равно половине длины бегущей волны $x_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{2}$. Пучности и узлы сдвинуты друг относительно друга на четверть $\frac{\lambda}{4}$ длины волны.

Для сравнения бегущей и стоячей волн заполните таблицу.

	Бегущая волна	Стоячая волна
Уравнение		
Амплитуда		
Фаза		

Все точки, расположенные между двумя узлами в стоячей волне, колеблются в одной фазе. Точки с обеих сторон узла движутся в противоположной фазе, то есть фаза колебаний сдвигается до π . В отличие от бегущих волн в стоячей волне отсутствует перенос энергии. Сумма энергий всех точек, расположенных на расстоянии, равном четверти длины волны, становится постоянной. Между точками происходит обмен энергии. Дважды за период происходит превращение энергии стоячей волны то полностью в потенциальную, сосредоточенную в основном вблизи узлов волны, то полностью в кинетическую, сосредоточенную в основном вблизи пучностей волны. Прямые и обратные волны, образующие стоячую волну, несут одинаковую энергию в противоположных направлениях.

Средний поток энергии в любом поперечном сечении волны равен нулю.

В том случае, когда волна отражается от среды более плотной, чем та среда, где распространяется волна, в месте отражения возникает узел, фаза изменяется на противоположную (рис. 17.2, а). При этом говорят, что происходят потери половины волн. Когда волна отражается от среды менее плотной, в месте отражения появляется пучность и потери половины волны нет (рис. 17.2, б).

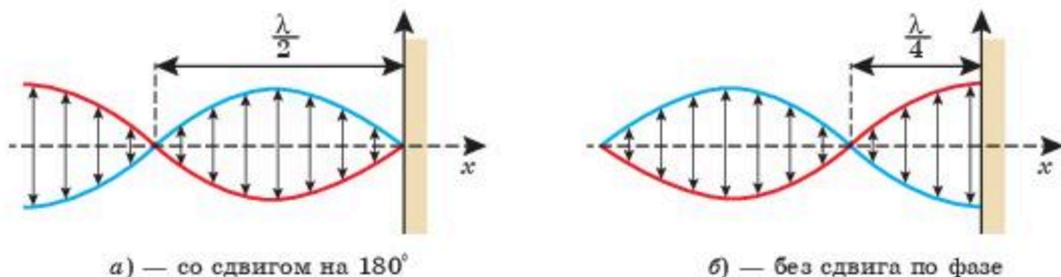


Рис. 17.2

Колебания струны. При возбуждении поперечной волны в натянутой струне (например, инструментов, таких как домбра, жетиген, гитара), закрепленной с двух сторон, образуется стоячая волна и в местах закрепления струны располагаются узлы (рис. 17.3).

Поэтому в струне возбуждаются только такие колебания, половина длины волн которых укладывается на длине струны целое число раз. Из этого следует условие $l = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ или $\lambda_n = \frac{2l}{n}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), где l — длина струны. Длина волны соответствует частотам

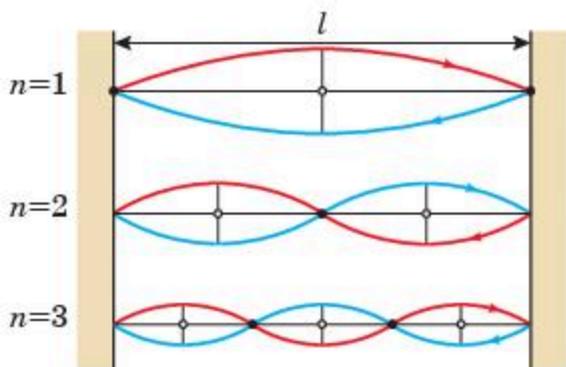
$$v_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где v — фазовая скорость волны, определяемая по линейной плотности струны. v_n частоты называют *собственными частотами* колебаний струны.

Если один конец струны закреплен, то на месте закрепления будет узел, на свободном конце располагается пучность (рис. 17.4).

Тогда максимальная длина стоячей волны $\lambda = 4l_1$, соответственно, частота $v = \frac{v}{2l}$.

Общая формула частоты собственных колебаний $v_n = n \frac{v}{4l}$, где $n = 1, 3, 5, \dots$



- — узлы стоячей волны
- — пучности стоячей волны

Рис. 17.3

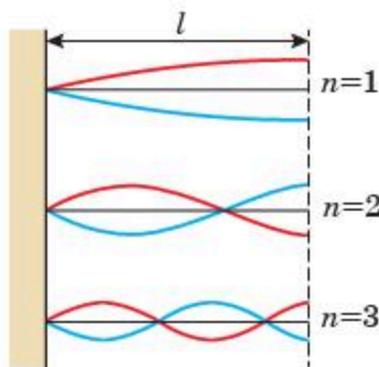


Рис. 17.4

Удельные частоты кратны частотам, называемыми основными частотами.

$$\nu_1 = \frac{\nu}{2l},$$

Частоты, соответствующие частотам с $n = 2, 3, \dots$ называются *обертонами* (первый обертон соответствует $n = 2$, второй обертон $n = 3$ и т. д.).

В общем случае колебания струн могут представлять собой несколько стоячих волн с различными собственными частотами.



1. Какая волна называется стоячей волной? Объясните процесс формирования стоячей волны.
2. Дайте определение узлам и скоплениям стоячей волны.
3. Почему длина и частота стоячей волны равны?
4. Почему стоячие волны не переносят энергию? Докажите.
5. Какие частоты называют обертонами?



1. Изучите музыкальные инструменты, в которых возникают стоячие звуковые волны.
2. Опишите стоячие волны, образующиеся в воздухе в трубах, которые открыты с обеих сторон и открыты наполовину.

§ 18. Принцип Гюйгенса. Дифракция волн



Ключевые понятия:

- ✓ принцип Гюйгенса
- ✓ вторичная волна
- ✓ дифракция волн

На этом уроке вы:

- рассмотрите принцип Гюйгенса и условия наблюдения дифракционной картины механических волн.



Механические волны в упругой изотропной среде распространяются прямолинейно и равномерно. Теперь рассмотрим, что произойдет, когда волна встретит препятствие, например, скалу или твердую стену. Голландский физик Христиан Гюйгенс сформулировал в 1690 году общий принцип, описывающий поведение волн. Впоследствии этот принцип был назван принципом Гюйгенса.

Принцип Гюйгенса: каждая точка среды, до которой дошел фронт волны, сама становится источником вторичных волн.

Вторичные волны являются сферическими, если среда однородная. Зная положение волновой поверхности в некоторый момент времени t , можно найти ее положение в момент $t + \Delta t$, если, согласно принципу Гюйгенса, рассматривать каждую точку волновой поверхности как источник сферических вторичных волн (рис. 18.1, а).

Волновая поверхность в следующий момент времени будет представлять собой огибающую волновых поверхностей вторичных волн,

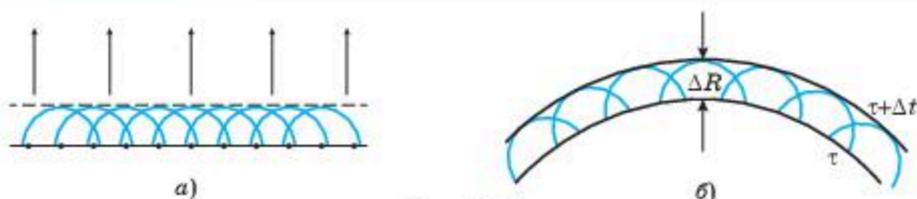


Рис. 18.1

каждая из которых распространилась на расстояние $\Delta R = v \cdot \Delta t$.

На рисунке 18.1 а и б сплошной линией показана волновая поверхность в момент времени t , а пунктирной линией — волновая поверхность в момент $t + \Delta t$, построенная в соответствии с принципом Гюйгенса. В однородной среде плоская волна остается плоской (рис. 18.1, а), а сферическая волна — сферической (рис. 18.1, б). Принцип Гюйгенса одинаково пригоден для волн любой природы — не только механических, но и электромагнитных, в том числе световых. Гюйгенс сформулировал свой принцип, имея в виду механические волны, в частности, звуковые. В этом случае принцип Гюйгенса имеет наглядное объяснение: *частицы среды, до которых доходят колебания, начинают, в свою очередь, колебаться и возбуждают колебания соседних частиц среды.*

Христиан Гюйгенс
(1629—1695)

Дифракция волн. Если на пути светового пучка возникает непрозрачное препятствие, то за ним образуется тень. От звуковых же волн трудно заслониться. Звук слышно даже из-за угла или за бетонным забором. Появляется естественный вопрос: почему эти препятствия не приводят к возникновению “звуковой тени”? Аналогичный вопрос встает при рассмотрении распространения волны по поверхности озера, если на ее пути появляется препятствие в виде небольшого камня, выступающего из воды. Когда размер камня велик, то образуется “тень” — область пространства, куда энергия волны не попадает. Исходя из этих наблюдений, можно прийти к выводу, что *на поведение волны влияет соотношение между размерами встречающегося препятствия и длиной волны.* Если размеры препятствия и длины волны соизмеримы, то мы можем наблюдать, как волны огибают препятствия.

Отклонение волн от прямолинейного распространения или огибание волнами препятствий называется дифракцией (лат. *diffRACTUS* — “разломанный”). Явление дифракции волн на поверхности воды можно наблюдать с помощью прибора для демонстрации волновых свойств. Если на пути волн поместить экран с узкой щелью, размеры которой меньше длины волны (рис. 18.2), то за экраном будет распространяться круговая

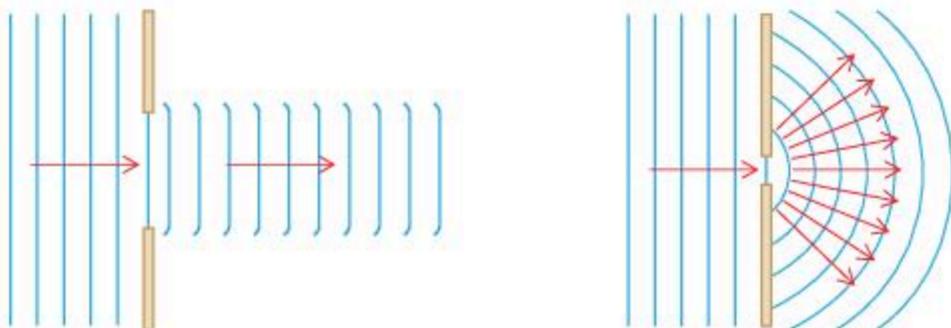


Рис. 18.2

волна. Это легко объяснить, опираясь на принцип Гюйгенса. Каждая точка среды, до которой дошла волна, сама является источником вторичных волн. А вторичные волны в узкой щели располагаются очень близко друг к другу, и поэтому их можно рассматривать как один точечный источник. Если же размеры щели велики по сравнению с длиной волны, то волны, проходя сквозь нее, практически не изменяют своей формы.



1. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
2. При каких условиях наблюдается дифракция?
4. Понаблюдайте дифракцию на поверхности воды и объясните увиденное.

Примеры решения задач

Задача 1. Волна с частотой колебаний 5 Гц распространяется в пространстве со скоростью 3 м/с. Найдите разность фаз волны в двух точках пространства, отстоящих друг от друга на расстоянии 20 см и расположенных на прямой, совпадающей с направлением распространения волны.

Дано:
 $\nu = 5 \text{ Гц}$
 $v = 3 \text{ м/с}$
 $l = 20 \text{ см}$

 $\varphi - ?$

Решение. Так как на расстоянии, равном длине волны, разность фаз 2π , то на расстоянии l разность фаз будет равна $\Delta\varphi = \frac{2\pi l}{\lambda}$. Длину волны найдем по формуле: $\lambda = \frac{v}{\nu}$. С учетом этого получим, что искомая разность фаз равна: $\Delta\varphi = \frac{2\pi l\nu}{v}$.

После проведения вычислений получим, что $\Delta\varphi = \frac{2\pi l\nu}{v}$;
 $\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot 0,2 \cdot 5 \text{ Гц}}{3 \text{ м/с}} = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ$. Проверим единицы измерения:

$$[\Delta\varphi] = \frac{\text{рад} \cdot \text{м} \cdot \frac{1}{\text{с}}}{\frac{\text{м}}{\text{с}}} \text{ рад.}$$

$$(\Delta\varphi = 120^\circ)$$

Задача 2. С лодки в озеро бросили камень и по водной поверхности пошли волны. Наблюдатель, находившийся на берегу, заметил, что за 20 с произошло 40 всплесков волны о берег. Найдите расстояние от лодки до берега, если расстояние между первым и третьим гребнями 1 м, а волна добежала до берега за 30 с.

Дано:

$$\tau_1 = 30 \text{ с}$$

$$N = 40$$

$$\tau_2 = 20 \text{ с}$$

$$\Delta l = 1 \text{ м}$$

$$l = ?$$

Решение. Так как волны в однородной среде распространяются равномерно и прямолинейно, то расстояние от берега до лодки будет равно:

$$l = v\tau_1, \quad (18.1)$$

где v — скорость волны. Ее найдем по формуле.

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad (18.2)$$

где λ — длина волны; T — период колебаний частиц в волне.

В нашем случае $\lambda = \frac{\Delta l}{2}$, а $T = \frac{\tau_2}{N}$. Поэтому $v = \frac{\lambda \cdot N}{\tau_2} = \frac{\Delta l \cdot N}{2\tau_2}$.

Подставив это значение скорости в формулу (18.1), получим, что

$$l = \frac{\Delta l \cdot N \cdot \tau_1}{2\tau_2}. \text{ Произведя вычисления, имеем } l = \frac{1 \text{ м} \cdot 40 \cdot 30 \text{ с}}{2 \cdot 20 \text{ с}} = 30 \text{ м}.$$

Проверим единицы измерения: $[l] = \frac{\text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}} = \text{м}. \quad (l = 30 \text{ м})$

Задача 3. От одного источника до некоторой точки M звук доходит за 0,35 с, а от другого источника до этой же точки — за 0,38 с. Что будет наблюдаться в точке M : усиление или ослабление звука, если волны когерентные с длиной волны 6,8 м?

Дано:

$$\tau_1 = 0,35 \text{ с}$$

$$\tau_2 = 0,38 \text{ с}$$

$$\lambda = 6,8 \text{ м}$$

$$v = 340 \text{ м/с}$$

$$k = ?$$

Решение. Условие максимума при интерференции волн выглядит так: $\Delta l = k\lambda$, где Δl — разность хода волн, k — это целые числа: 1; 2; 3 и т. д. Таким образом, если мы найдем, что число k будет целым, то в точке M звук будет усиливаться, если же k будет не целым, то звук станет тише. Для определения разности хода определим расстояния от первого и второго источников звука до точки M : $l_1 = v \cdot \tau_1$ и $l_2 = v \cdot \tau_2$. Тогда разность хода будет равна:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = v(\tau_2 - \tau_1).$$

Так как $k = \frac{\Delta l}{\lambda}$, то получим $k = \frac{v(\tau_2 - \tau_1)}{\lambda}$.

Произведем вычисления: $k = \frac{340 \text{ м/с} \cdot (0,38 - 0,35) \text{ с}}{6,8 \text{ м}} = 1,5$; k — не целое число, следовательно, в точке M будет наблюдаться ослабление звука.

Проверим единицы измерения: $[k] = \frac{\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{с}}{\text{м}} = 1$.

(Ослабление)



Упражнение 11

1. Определите длину волны при частоте 440 Гц, если скорость распространения волн 340 м/с.

Ответ: 77 см.

2. Определите расстояние между двумя ближайшими точками бегущей волны, лежащими на одном луче и колеблющимися в одинаковых фазах, если скорость распространения волн 5 км/с, а частота колебаний 100 кГц.

Ответ: 5 см.

3. Мимо неподвижного наблюдателя, стоящего на берегу озера, за 12 с прошло восемь гребней волн. Расстояние между первым и третьим гребнями равно 12 м. Определите период колебаний частиц воды и скорость распространения.

Ответ: 1,5 с; 4 м/с.

4. Уравнение колебаний вибратора $x = 3,0 \sin 20\pi t$ (см). Считая волну плоской, определите смещение точки, расположенной в 5 м от источника колебаний, через 0,1 с после начала колебаний при скорости распространения волны 200 м/с.

Ответ: -3 см.

5. Плоская волна длиной 6 м распространяется в среде со скоростью 25 м/с. Амплитуда колебаний 50 см. Определите: максимальную скорость колебаний частиц среды, перемещение и путь частиц среды за период. Запишите уравнение волны. В начальный момент смещение частиц в волне равно половине амплитуды.

Ответ: $v_m = 13 \text{ м/с}$; 0 м;

$$l = 4x_m = 2 \text{ м}; x = 0,5 \sin(8,3\pi t + \frac{\pi}{6}).$$

6. Наблюдатель, находящийся в 4 км от артиллерийского орудия, услышал звук выстрела через 12 с после вспышки. Определите скорость звука в воздухе.

Ответ: 333 м/с.

7. Человек воспринимает звуки с частотой от 16 до 20000 Гц. Определите интервал длин волн, воспринимаемых человеком. Скорость звука в воздухе 340 м/с.

Ответ: от 21,25 см до 17 мм.

8. Звуковое ощущение сохраняется у человека примерно 0,10 с. На каком расстоянии должен находиться человек от преграды, чтобы слышать отдельно основной и отраженный от преграды звуки? Скорость звука в воздухе 340 м/с.

Ответ: 17 м.

9. С первого корабля на второй одновременно посылаются два звуковых сигнала по воздуху и по воде. Один сигнал был принят после другого через 2 с. Определите расстояние между кораблями, если скорость звука в воздухе 340 м/с, а в воде 1480 м/с.

Ответ: 883 м.

10. Два когерентных источника колеблются в одинаковых фазах с частотой 300 Гц. Скорость распространения колебаний в среде 1,5 км/с. Определите, при какой минимальной разности волновых путей будут наблюдаться максимальное усиление колебаний и максимальное ослабление. Каков результат интерференции в точке, расположенной от первого источника на расстоянии 20 м и от второго на расстоянии 30 м?

Ответ: 5 м; 2,5 м; max.

Самое важное в главе 4

- Процесс распространения колебаний в среде называется *волновым движением*.

- *Волна* — это колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

- При распространении колебаний происходит передача энергии в окружающую среду, поэтому для существования непрерывной волны нужен источник колебаний, находящийся в данной упругой среде. При волновом движении с одной территории пространства в другую транспортируются не частицы, а *энергия*.

- Если частицы среды делают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волн, волны называются *поперечными*.

- Поперечные волны распространяются только в упругой твердой среде или на границе двух сред различной упругости (например, на поверхности воды). Волны называются *продольными*, если направление колебаний частиц среды соответствует направлению распространения волн. Продольные волны распространяются на твердых, жидких и газообразных телах.

- Уравнение бегущей волны имеет следующий вид:

$$y = A \sin(\omega t - kx).$$

- Плотность энергии бегущих волн в рассматриваемом случае:

$$w = \frac{E\varepsilon^2}{2} \text{ или } w = \frac{\rho v^2 \varepsilon^2}{2}.$$

• Явление наложения друг на друга двух или нескольких когерентных волн, при котором в пространстве образуется устойчивая, не изменяющаяся со временем картина распределения амплитуды результирующих колебаний (чередуются их минимумы и максимумы) в различных точках пространства, называется *интерференцией*.

• Для того чтобы в пространстве возникла такая картина, необходимо, чтобы налагающиеся волны имели одинаковую частоту и неизменный сдвиг фаз колебаний в каждой точке пространства. Такие волны называются *когерентными*. Они создаются когерентными источниками волн, которые колеблются с одинаковой частотой и постоянным сдвигом фаз.

- Условие максимума интерференции:

$$\frac{2\pi}{\lambda}(l_1 - l_2) = 2k\pi \text{ или } \Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

а уравнение:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

— условие минимума.

• *Стоячая волна* — это волны, образующиеся в результате наложения двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами.

Уравнение стоячей волны:

$$y = 2A \cos \frac{2\pi l}{\lambda} \cdot \sin \omega t.$$

Амплитуда колебаний в стоячей волне:

$$A_{\text{ст}} = 2A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x \right).$$

• **Принцип Гюйгенса:** каждая точка среды, до которой дошел фронт волны, сама становится источником вторичных волн.

• Отклонение волн от прямолинейного распространения или огибания волнами препятствий называется *дифракцией* (лат. *diffractus* — обломок).

Глава 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

§ 19. Электромагнитное поле



Ключевые понятия:

- ✓ вихревое электрическое поле
- ✓ ток смещения

На этом уроке вы:

- узнаете о теории Максвелла;
- объясните как образуется переменное магнитное поле и почему.



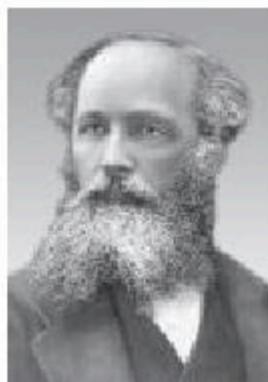
Это вы знаете

Многие закономерности волновых процессов универсальны для всех волн различной природы: механических волн в упругой среде; волн на поверхности воды и т. д. Это свойственно также электромагнитным волнам, являющимся процессами распространения электромагнитных колебаний. Однако, если другие виды волн распространяются в какой-то материальной среде, электромагнитные волны могут распространяться как в вакууме, так и в веществе. К *электромагнитным волнам* относятся радиоволны, инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи.

В механической картине мира, созданной И. Ньютоном, считалось, что все тела действуют друг на друга либо непосредственно, либо через пустоту и мгновенно. В этом состоит суть теории дальнодействия. Но она не смогла объяснить характер протекания электромагнитных явлений. Английский физик М. Фарадей, введя в физику понятие поле, предложил миру теорию близкодействия — любые взаимодействия осуществляются посредством силовых полей и с конечной скоростью.

В 1860—1865 гг. английский физик Д. К. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, которая объединила электрическое и магнитное взаимодействия в единое электромагнитное. Основу теории электромагнитного поля составляет система уравнений Максвелла. Из уравнений Максвелла следовало, что должны существовать электромагнитные волны, что и было подтверждено экспериментами Г. Герца.

В 1950 г. А. Эйнштейн писал: “Вообразите себе охватившие его чувства, когда полученные им дифференциальные уравнения показали, что электромагнитные поля распространяются в виде поляризованных волн со скоростью света. Мало кому в мире довелось испытать такое!”.



Джеймс Максвелл
(1831—1879)

Возникновение переменного электрического поля при изменении магнитного поля. Исследуя открытое Фарадеем в 1831 г. явление электромагнитной индукции, Максвелл пришел к выводу: *любое изменение магнитного поля вызывает появление в окружающей среде вихревого электрического поля.* Оказалось, что в опытах Фарадея индукционные ЭДС в замкнутом проводнике создаются этим вихревым электрическим полем. Особенность этого явления заключается в том, что вихревое электрическое поле появляется не только в проводнике (он в данном случае — прибор, обнаруживающий это поле), но и в окружающем проводник пространстве. При изменении индукции магнитного поля $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ в любых точках пространства возникает вихревое электрическое поле. Силовые линии электрического поля охватывают линии магнитной индукции и располагаются в плоскости, перпендикулярной им.

Если магнитная индукция возрастает $\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0$, то направление вектора напряженности вихревого электрического поля \vec{E} определяется *правилом левой руки* (рис. 19.1, а). При уменьшении магнитной индукции $\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0$ направление вектора напряженности определяется *правилом правой руки* (рис. 19.1, б). Таким образом, электрические заряды и переменное магнитное поле порождают электрическое поле.

Из идей Максвелла следовал и другой важный вывод: в природе отсутствуют магнитные заряды. Здесь, кажется, не сохраняются свойства обратимости и симметрии в природе. Почему переменное электрическое поле в свою очередь не осуществляет обратный процесс, порождающий магнитное поле?

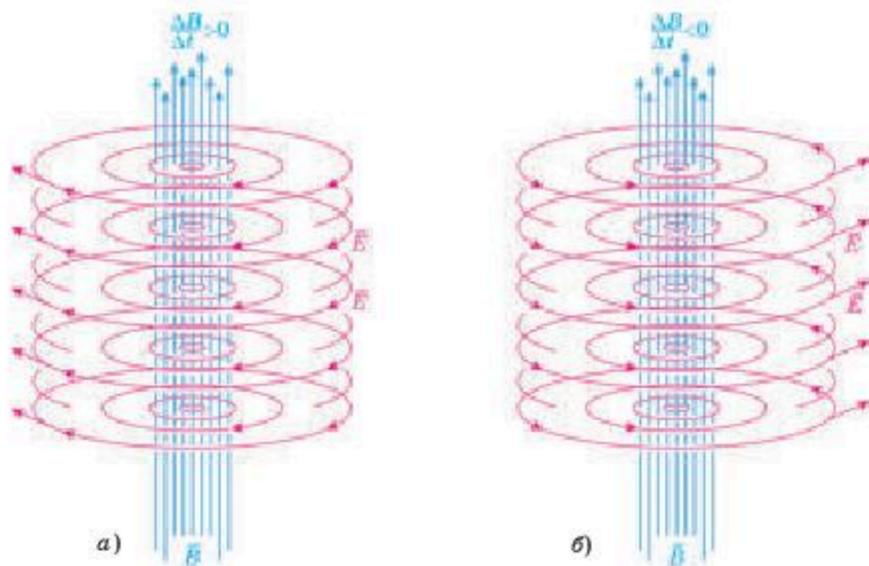


Рис. 19.1

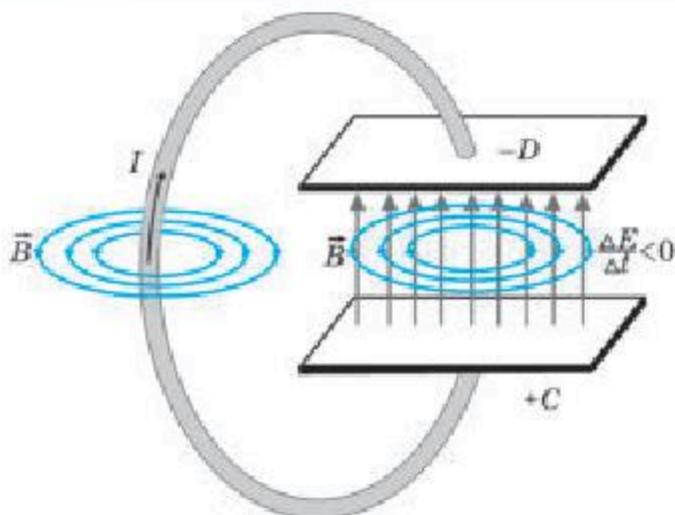


Рис. 19.2

Возникновение переменного магнитного поля при изменении электрического поля. Существование такого процесса в природе было предсказано Максвеллом. К этому выводу он пришел, изучая взаимодействие проводников, по которым течет постоянный ток. Это взаимодействие подчиняется закону Ампера. Установив, что закон Ампера выполняется при взаимодействии проводников в момент прохождения по ним постоянного тока, Максвелл задался мыслью: *выполняется ли этот закон, если проводник не замкнут и создает импульс переменного тока?*

Максвелл исследовал разряд конденсатора, заполненного диэлектриком (рис. 19.2). За то короткое время, в течение которого происходит разряд конденсатора, ток проводимости, направленный от обкладки C к обкладке D, создает переменное магнитное поле. Ток проводимости обрывается между обкладками конденсатора. Но в то же время обнаружено, что в диэлектрике между обкладками конденсатора появляется переменное магнитное поле. Максвелл предположил, что *магнитное поле порождается изменяющимся во времени электрическим полем*. Переменное электрическое поле в вакууме или в диэлектрике Максвелл назвал *током смещения*. Таким образом, Максвелл впервые выдвинул гипотезу о том, что *переменное электрическое поле всегда вызывает появление переменного магнитного поля*. Линии индукции магнитного поля охватывают линии напряженности электрического поля и перпендикулярны им. Вектор индукции магнитного поля, возникающего при росте напряженности электрического поля $\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0$, образует с вектором \vec{E} правый винт (рис. 19.3, а). И наоборот, при уменьшении напряженности электрического поля $\frac{\Delta E}{\Delta t} < 0$, вектор маг-

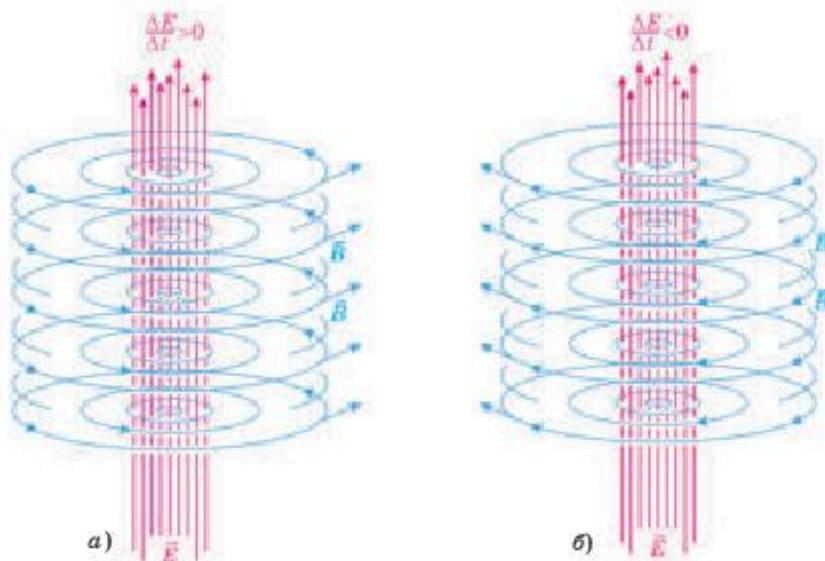


Рис. 19.3

нитной индукции \vec{B} с вектором \vec{E} образует левый винт (рис. 19.3, б). С введением понятия *ток смещения* любой электрический ток можно рассматривать как замкнутый и его называют *полным током*:

$$I_n = I_{\text{пров}} + I_{\text{см}}.$$

Например, *ток проводимости* (упорядоченное движение электронов) в колебательном контуре переходит в ток смещения между обкладками конденсатора (переменное электрическое поле).

Надо заметить, что при прохождении тока смещения не выделяется тепло по закону Джоуля — Ленца, как в случае тока проводимости.

Единство и относительность электрического и магнитного полей. После установления Максвеллом тесной связи между электрическим и магнитным полями было доказано существование особого вида материи — *электромагнитного поля*. Установили невозможность существования отдельно, независимо друг от друга, электрического и магнитного полей. Электрическое поле создается электрическими зарядами или переменным магнитным полем. Магнитное поле создается электрическим током или вихревым электрическим полем. В частном случае постоянного поля обнаруживаются свойства электрического поля ($\vec{E} \neq 0, \vec{B} = 0$) или магнитного поля ($\vec{B} \neq 0, \vec{E} = 0$). Нельзя утверждать, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не указав систему отсчета, по отношению к которой эти поля рассматриваются. Рассмотрим заряженный шар, подвешенный на шелковой нити (рис. 19.4). Наблюдатель находится в системе отсчета, связанной с землей. У покоящегося относительно

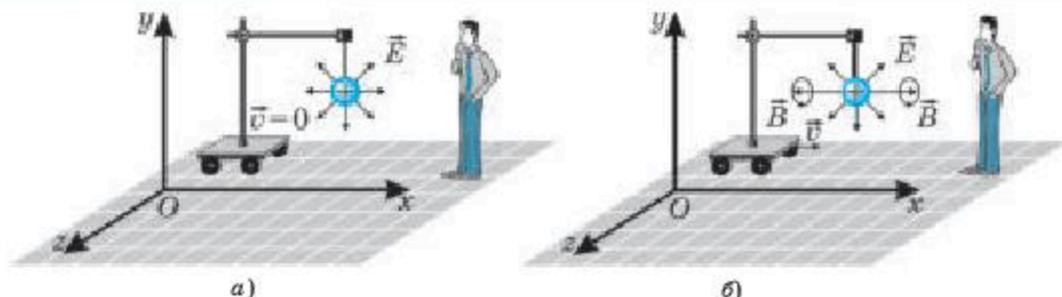


Рис. 19.4

земли заряженного шара проявляется только электрическое поле (рис. 19.4, а). Движущийся заряженный шар в пространстве создает еще и магнитное поле (рис. 19.4, б). Если наблюдатель станет на движущуюся тележку, то для него вокруг заряженного шара будет наблюдаться только электрическое поле.

То есть существование в пространстве того или иного поля зависит от выбора системы отсчета. И не одно из полей не имеет преимуществ друг перед другом.

Электромагнитное поле едино. Анализируя свои уравнения, описывающие электромагнитное поле, Максвелл сделал вывод: *электромагнитное поле может распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн.* Благодаря теории Максвелла были объяснены многочисленные явления, происходящие в звездах и на планетах, даже во Вселенной, а также в микромире и внутри атомов.



1. Какие идеи Фарадея нашли свое продолжение в теории Максвелла?
2. Каковы источники вихревого электрического поля?
3. Как можно объяснить, что магнитное поле создается не только движущимися зарядами, но и изменяющимся во времени электрическим полем?
4. В чем сходство и различие между токами проводимости и смещения?
5. Перечислите основные физические величины в теории Максвелла.
6. Назовите источники электрической компоненты электромагнитного поля.
7. В чем отличие потенциального и вихревого полей?
8. Назовите магнитную составляющую электромагнитного поля.
9. Какие идеи привели к введению понятия электромагнитного поля?
10. Почему взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля в одной системе отсчета могут быть взаимно перпендикулярны и в другой?
11. Объясните, почему при переходе из системы отсчета, где существует электрическое поле, в другую систему отсчета образуется магнитное поле, и наоборот.

§ 20. Электромагнитные волны



Ключевые понятия:

- ✓ электрическая и магнитная постоянные
- ✓ свет

На этом уроке вы:

- объясните условия возникновения электромагнитных волн и опишите их свойства.



Распространение колебаний переменного электромагнитного поля в пространстве называется **электромагнитными волнами**. По предположению Максвелла, электромагнитная волна может распространяться вдоль проводника с током, в диэлектрике и даже в вакууме, где нет упругой среды. Одно из важнейших следствий теории Максвелла: *электромагнитная волна распространяется с конечной скоростью*. По его расчетам скорость распространения электромагнитной волны равна:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}},$$

а в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (20.1)$$

где $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ — электрическая и $\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ — магнитная постоянные. Это важнейшее свойство электромагнитного поля. Скорость распространения электромагнитной волны в среде определяется формулой Максвелла:

$$v = \frac{c}{n} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (20.2)$$

где n — показатель преломления среды; ϵ — диэлектрическая проницаемость; μ — магнитная проницаемость среды.

Найденная с помощью расчетов скорость электромагнитной волны в вакууме оказалась равной скорости света, определенной прямыми измерениями, что имело огромное значение: *свет* — это частный случай *электромагнитных волн*. (С некоторыми свойствами света, подтверждающими эти выводы, ознакомимся в главе 6.)

Теперь рассмотрим механизм распространения электромагнитной волны в пространстве. При изучении предыдущей темы мы подробно рассмотрели взаимные превращения переменных электрического и магнитного полей. Чтобы осуществить эти взаимные преобразования в какой-либо части пространства, необходимо создать возмущение одного из полей. На рисунке 20.1 показан процесс распространения возмущения вихревых электрического и магнитного полей. Это можно осуществить

с помощью колеблющегося около равновесного положения заряда или движущегося по окружности заряда. Вокруг заряда возникает колеблющееся с достаточно большой частотой электрическое поле, модуль и направление вектора напряженности \vec{E} которого изменяются периодически: $E = E_0 \sin \omega t$

В этот же момент возникает вектор индукции магнитного поля \vec{B} , модуль и направление которого также изменяются периодически:

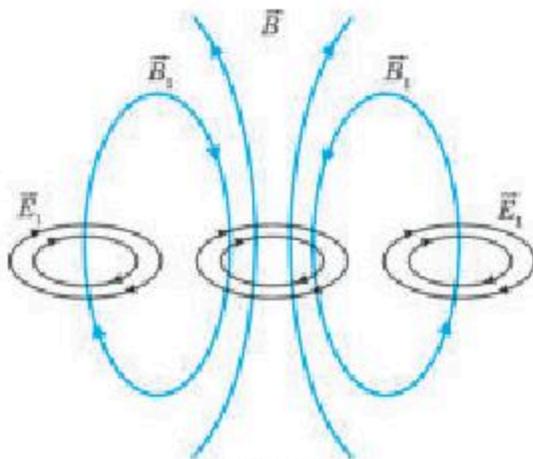


Рис. 20.1

$$B = B_0 \sin \omega t$$

Эти колебания полей доходят до ближайших точек окружающего пространства, куда взаимно перпендикулярные векторы напряженности электрического и индукции магнитного полей дойдут с некоторым отставанием. Уравнение гармонической волны напряженности электрического поля, распространяющейся по правильному направлению оси Ox :

$$E = E_0 \sin \omega t \left(t - \frac{x}{c} \right).$$

Индукция магнитного поля электромагнитной волны также изменяется синхронно с напряженностью электрического поля во времени и пространстве. Поэтому уравнение гармонической волны для индукции магнитного поля, можно написать следующим образом:

$$B = B_0 \sin \omega t \left(t - \frac{x}{c} \right).$$

Таким образом, электромагнитное поле распространяется в пространстве со скоростью равной $3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ в виде электромагнитной волны (рис. 20.2). Фазы колебаний бывают одинаковы в любой точке векторов \vec{E} и \vec{B} электромагнитной волны.

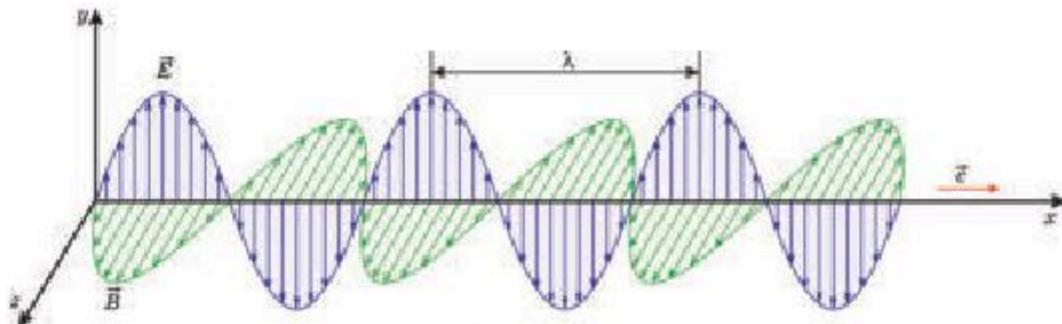


Рис. 20.2

Расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одной и той же фазе, называется длиной электромагнитной волны:

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \quad (20.3)$$

Основной характеристикой электромагнитной волны является ее частота колебаний ν (или период T). При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую меняется скорость распространения волны и ее длина, а частота остается постоянной.

Направления колебания векторов напряженности электрического поля и индукции магнитного поля перпендикулярны направлению распространения волны. Значит, электромагнитная волна является поперечной волной. Скорость распространения электромагнитной волны перпендикулярна плоскостям векторов напряженности и индукции. Значит, векторы и в электромагнитной волне взаимно перпендикулярны, и также перпендикулярны направлению распространения волны. Если правый буравчик повернуть от вектора \vec{E} к вектору \vec{B} , то направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением вектора скорости волны \vec{c} (рис. 20.2). Известно, что электромагнитные волны испускаются и распространяются колеблющимися зарядами. Как это происходит?

При изменении силы тока в проводнике изменяется и его магнитное поле. Изменение силы тока вызвано изменением скорости движения электрических зарядов в проводнике, т. е. ускорением движения зарядов. Этот факт подтверждается экспериментом. Значит, электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении электрических зарядов. Чем больше ускорение зарядов, тем больше интенсивность испускаемых волн. При ускоренном движении заряженной частицы появляется характерное для электромагнитного поля инерционное свойство. Электромагнитное поле отрывается от ускоренно движущейся частицы и свободно распространяется в форме электромагнитной волны.



1. Какую волну называют электромагнитной?
2. Как определили скорость распространения электромагнитной волны в вакууме и среде?
3. Возникает ли электромагнитная волна, если скорость изменений напряженности электрического поля стабильна в определенной области пространства?
4. Как электрические и магнитные векторы гармонической электромагнитной волны изменяются на расстоянии от ее источника?
5. Как связаны электрический и магнитный векторы плоской электромагнитной волны?
6. Как можно определить направление распространения электромагнитной волны?
7. Почему возникают электромагнитные волны при ускоренном движении электрического заряда?



Исследуйте, какие физические процессы могут служить источниками электромагнитных волн.

§ 21. Излучение электромагнитных волн. опыты Герца



Ключевые понятия:

- ✓ колебательный контур
- ✓ импульс тока
- ✓ электромагнитная волна

На этом уроке вы:

- объясните причину излучения волны при электромагнитных колебаниях;
- узнаете, какие физические процессы могут служить источником электромагнитных колебаний.



Правильность теории может подтвердить лишь эксперимент, и в этом споре последнее слово всегда остается за ним. В существовании электромагнитных волн в природе у Максвелла не было сомнений. Как большинство физиков того времени, известный немецкий физик Генрих Герц относился к теории Максвелла скептически. Но он и был первым физиком, подтвердившим правоту Максвелла экспериментально — в 1887—1888 гг. доказал существование электромагнитных волн.

Открытый вибратор. Как получить экспериментально электромагнитные волны?

Как мы знаем, колебания электромагнитного поля в колебательном контуре не могут распространяться в пространстве. Причина этого в том, что *переменное электрическое поле почти полностью сосредоточено между обкладками конденсатора, а магнитное поле — в катушке* (рис. 21.1, а). Такой контур называется **закрытым**. Если обкладки конденсатора удалять друг от друга, то электрическое поле начнет охватывать все больше объема в пространстве. При уменьшении емкости конденсатора по формуле Томсона собственная частота колебаний $\left(\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}\right)$ растет. Если одновременно еще уменьшить число витков катушки, то индуктивность L будет уменьшаться (рис. 21.1, б). Уменьшая площадь обкладок конденсаторов и одновременно распрямляя катушку, в конце концов получим отрезок прямого провода (рис. 21.1, в). Эта установка называется **открытым колебательным контуром** или **вибратором Герца**. Емкость и индуктивность открытого вибратора незначительны. Поэтому собственная частота колебаний электромагнитного поля вокруг вибратора очень высока.



Генрих Герц
(1857—1894)

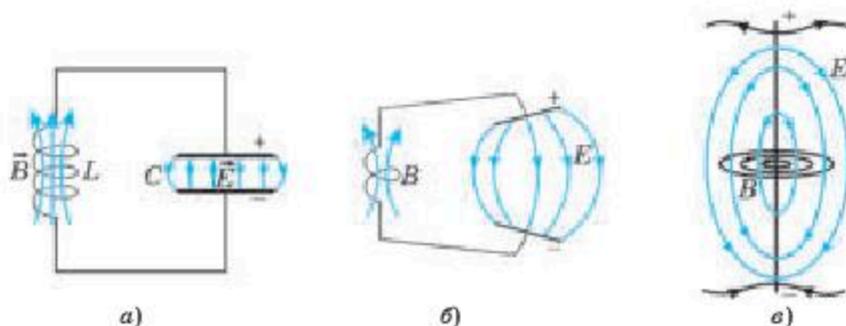


Рис. 21.1

Если сила переменного тока в замкнутой цепи вдоль всего проводника одинакова, то в открытом вибраторе ситуация совсем другая. В один и тот же момент времени в различных частях вибратора сила тока различна; когда сила тока в его середине достигает своего максимума, на его концах она равна нулю. Когда в открытом вибраторе сила тока достигает своего максимального значения, магнитное поле, возникающее вокруг него, также достигает своего максимума. А напряженность электрического поля равна нулю (рис. 21.1, а). Через четверть периода ($t \approx \frac{1}{4}T$) сила тока равна нулю, на концах вибратора накапливаются электрические заряды (рис. 21.1, б). Напряженность электрического поля достигает максимального значения. Так появляются колебания силы тока и зарядов, т. е. электромагнитное поле охватывает все пространство вокруг вибратора.

Таким образом, *в окружающем открытый вибратор пространстве под влиянием переменного магнитного поля появляется вихревое электрическое поле, которое в свою очередь порождает магнитное поле.*

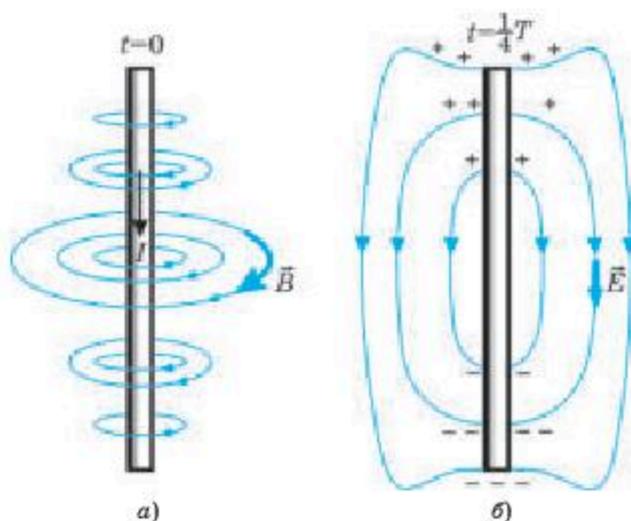


Рис. 21.2

В результате вокруг вибратора возникают колебания полей, т. е. излучается электромагнитная волна.

Опыты Герца. Для получения электромагнитной волны Герц использовал вибратор, состоящий из двух одинаковых отрезков проводника, разделенных воздушной прослойкой (рис. 21.3, а). Благодаря разделению двум ветвям вибратора с помощью источника напряжения можно подать значительное количество заряда. Когда разность потенциалов достигает определенного значения, проскакивает электрическая искра. По ионизированному воздуху электрические заряды протекнут от одной половины вибратора к другой половине и возникнет импульс тока.

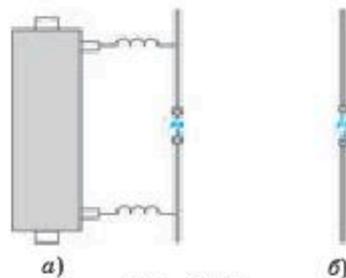


Рис. 21.3

Таким образом, в открытом контуре возникнут электромагнитные колебания. Быстро изменяющийся ток, не замыкаясь на источнике тока, должен вырабатываться лишь в контуре. Его регулируют включением дросселя между вибратором и источником тока. Быстрое убывание электромагнитных колебаний в открытом контуре связано, главным образом, с переносом энергии излучения волны и выделением тепловой энергии в контуре.

В электромагнитной волне векторы напряженности электрического поля \vec{E} и индукции магнитного поля \vec{B} взаимно перпендикулярны. Вектор \vec{E} лежит в плоскости, проходящей через вибратор, а вектор \vec{B} перпендикулярен этой плоскости и направлению распространения волны. Поэтому линии магнитной индукции описывают концентрические окружности, перпендикулярные вибратору. Магнитные линии в точках на расстоянии $\frac{\lambda}{2}$ изменяют свое направление (рис. 21.4).

Интенсивность электромагнитной волны максимальна в направлении, перпендикулярном оси вибратора, и излучения вдоль оси не происходит. Для приема и регистрации электромагнитной волны Герц использовал второй вибратор — приемник (рис. 21.3, б). Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны, излучаемой открытым вибратором, в приемнике возбуждаются колебания тока. Если размеры вибраторов одинаковы, то собственные частоты их электромагнитных волн также одинаковы, но из-за резонанса амплитуда вынужденных колебаний в приемнике намного больше. Эти вынужденные колебания Герц наблюдал по искрам в очень маленьком воздушном промежутке приемной антенны. Ученый в своих опытах не ограничивался только получением и изучением электромагнитной волны. Он изучал свойства электромагнитных волн, присущие другим волнам. Герц на опыте определил скорость распространения электромагнитной волны — она

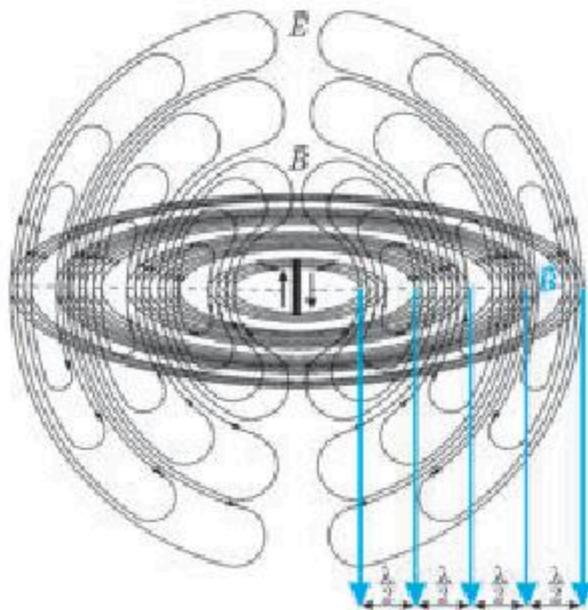


Рис. 21.4

оказалась равной скорости света. Таким образом, в своих экспериментальных исследованиях Герц доказал теоретические выводы Максвелла и сделал первый шаг к созданию электромагнитной теории света.



1. Объясните, почему закрытый колебательный контур не может излучать электромагнитные волны?
2. По какой причине в открытом вибраторе при электромагнитных колебаниях излучается волна?
3. Объясните опыты Герца по возбуждению и регистрации электромагнитных волн. Опишите их.
4. Какую роль играет искровой промежуток в излучающем и принимающем вибраторах?
5. Чем вызван расход энергии во время электромагнитных колебаний в контуре?
6. Закрытый колебательный контур заменен открытым колебательным контуром. Почему при этом электрические колебания быстро гаснут?
7. Какие физические процессы могут служить источником электромагнитных волн?



Упражнение 12

1. Сила тока в открытом колебательном контуре изменяется по закону $i = 0,2 \cos 5 \cdot 10^5 \pi t$. Найдите длину излучаемой электромагнитной волны λ в воздухе. Все величины измерены в единицах СИ.

Ответ: $\lambda = 1256$ м.

2. Найдите число колебаний, происходящих в электромагнитной волне с длиной волны 400 м за время, равное периоду звуковых колебаний с частотой 1 кГц.

Ответ: 750.

3. Сила тока в открытом колебательном контуре в виде стержня изменяется по закону $I = 400 \cos 2 \cdot 10^3 \pi t$ (мА). Найдите длину этого стержня.

Ответ: $l = 1,5$ м.

4. Как обеспечить настройку в резонанс индуктивностью 25 мкГн на длину волны 100 м?

Ответ: необходим конденсатор на 113 пФ.

5. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 1 мГн и двух последовательно соединенных конденсаторов емкостями 500 и 200 пФ. На какую длину волны настроен этот колебательный контур?

Ответ: 711 м.

6. При изменении силы тока в катушке индуктивности на 1 А за 0,6 с в ней индуцируется ЭДС 0,2 мВ. Какую длину волны излучает генератор, колебательный контур которого состоит из этой катушки и конденсатора емкостью 14,1 нФ?

Ответ: 7,2 м.

§ 22. Энергия электромагнитных волн



Ключевые понятия:

- ✓ плотность потока
- ✓ излучения электромагнитных волн

На этом уроке вы:

- рассмотрите распространение энергии электромагнитных волн и опишите их свойства.



Главная особенность всех видов волн в том, что они переносят не вещество, а энергию. Это свойственно и электромагнитным волнам.

Плотность потока электромагнитных волн. Ускоренно движущаяся заряженная частица излучает вокруг себя электромагнитные волны. Одной из главных энергетических характеристик электромагнитной волны является *плотность потока излучения электромагнитных волн*.

Плотностью потока электромагнитного излучения называют физическую величину, определяемую энергией электромагнитного поля, прошедшей за единицу времени через единичную поверхность, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

$$I = \frac{W}{S \cdot \Delta t} \text{ или } I = \frac{P_{\text{ср}}}{S}. \quad (22.1)$$

Видно, что плотность потока излучения представляет собой мощность излучения, проходящую через единичную площадь поверхности за один

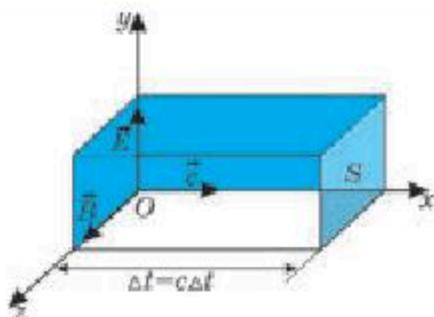


Рис. 22.1

период колебаний. Эту величину также называют *интенсивностью волны*.

Единица измерения плотности потока волны в СИ: $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Выделим в пространстве, где распространяется плоская электромагнитная волна, область с площадью поверхности S . Она расположена, как показано на рисунке 22.1, перпендикулярно скорости распространения волны.

Вся энергия, находящаяся в малом объеме $\Delta V = S \cdot c \cdot \Delta t$, за время Δt пройдет через эту поверхность. Энергия электромагнитного поля в этом объеме:

$$W = w \cdot \Delta V = w \cdot S \cdot c \cdot \Delta t, \quad (22.2)$$

где w — плотность энергии электромагнитной волны.

Подставив эту формулу в выражение (22.1), находим:

$$I = w \cdot c. \quad (22.3)$$

Плотность потока излучения электромагнитных волн равна произведению плотности энергии электромагнитной волны на скорость ее распространения.

Энергия электромагнитной волны, излучаемой вибратором Герца, точечными или другими источниками волн, изменяется с расстоянием. Если интенсивность волны для точечного источника волны одинакова по всем направлениям, то в вибраторе Герца максимальна в направлении, перпендикулярном оси. От гармонически колеблющегося заряда распространяется сферическая электромагнитная волна. Напряженность электрического поля и индукция магнитного поля этой сферической волны убывают обратно пропорционально первой степени расстояния: $\frac{1}{r}$. Это очень медленное убывание. Вспомним, что напряженность электростатического поля убывает как $E \sim \frac{1}{r^2}$. Поэтому электромагнитная волна может распространяться на большие расстояния от источника. А плотность потока излучения быстро убывает с расстоянием:

$$I = \frac{W}{S \cdot \Delta t} = \frac{W}{4\pi \cdot \Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}, \quad (22.4)$$

где $S = 4\pi R^2$ — площадь поверхности сферы.

Следовательно, интенсивность волны, образованной точечным источником, обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Теперь рассмотрим зависимость энергии электромагнитного поля от частоты колебания. Если заряд колеблется по гармоническому закону

$x = x_m \cos \omega t$, то его ускорение изменяется по времени по гармоническому закону $a = x'' = |\omega^2 x_m \cos \omega t|$. Электромагнитную волну испускают ускоренно движущиеся заряженные частицы. Значит, напряженность электрического поля и индукция магнитного поля волны прямо пропорциональны ускорению излучающих частиц. Плотность энергии электрического поля

$$w_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \quad (22.5)$$

и плотность энергии магнитного поля

$$w_x = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} \quad (22.6)$$

равны. Но так как энергия электрического поля в электромагнитной волне превращается в энергию магнитного поля и наоборот, то плотность энергии электромагнитного поля равна:

$$w = w_s + w_x = 2w_s; w_s = w_x = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}.$$

Если учесть, что напряженность электрического поля и индукция магнитного поля пропорциональны амплитуде колебаний и квадрату частоты ($E \sim a \sim \omega^2$ и $B \sim a \sim \omega^2$), то плотности энергии полей $w_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \sim \omega^4$ и $w_x = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} \sim \omega^4$ будут пропорциональны четвертой степени частоты. Плотность потока излучения или интенсивность волны, пропорциональна четвертой степени частоты:

$$I = w c \sim \omega^4.$$

Чем выше частота колебаний электромагнитного поля, тем выше и интенсивность волны.



1. Какой характеристикой волны является плотность потока электромагнитной волны?
2. Как меняется энергия волны с расстоянием? Какое значение это имеет в радиотехнике?
3. Как зависит энергия волны от частоты электромагнитных колебаний?
4. Почему в мобильных телефонах используют частоты 900, 1800 МГц?

Примеры решения задач

1. Максимальное значение напряженности электрического поля радиоволны не должно превышать $E_m = 0,5$ В/м. Какова интенсивность I электромагнитной волны при этих условиях?

Дано:

$$E_m = 0,5 \text{ В/м}$$

$$\varepsilon = 1$$

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

$$I - ?$$

Решение. Интенсивность электромагнитной волны определяем через объемную плотность энергии волны:

$$I = w_{\text{эм}} \cdot c.$$

Плотность энергии электромагнитной напряженности:

$$w_{\text{эм}} = 2w_{\text{эл}},$$

здесь $w_{\text{эл}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$, поэтому $w_{\text{эм}} = \varepsilon_0 \varepsilon E_m^2$. Тогда $I = \varepsilon_0 \varepsilon E_m^2 \cdot c$. Проверимединицу измерения: $[I] = \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}^2}{\text{В} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

$$I = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 25 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 664 \cdot 10^{-6} = 664 \frac{\text{мкВт}}{\text{м}^2}.$$

$$(664 \frac{\text{мкВт}}{\text{м}^2}).$$

2. Максимальная плотность потока электромагнитной волны, испускаемой с телебашни с расстояния 300 м, $I_1 = 40 \text{ мВт/м}^2$. Найдите плотность испускания волны I_2 с расстояния $r_2 = 120 \text{ км}$, при котором хорошо улавливается радиоволна.**Дано:**

$$r_1 = 300 \text{ м}$$

$$I_1 = 40 \text{ мВт/м}^2$$

$$r_2 = 120 \text{ км}$$

$$I_2 - ?$$

Решение. Интенсивность электромагнитной волны, находящейся от распространяющей антенны на расстоянии r_1 :

$$I_1 = w_1 \cdot c,$$

где w_1 — объемная плотность энергии электромагнитной волны, которая определяется напряженностью электрического поля:

$$w_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E_{m1}^2}{2}.$$

 E_{m1} обратно пропорционально расстоянию до антенны напряженности:

$$E_{\text{max}1} \sim \frac{1}{r},$$

поэтому плотность энергии волны w_1 обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$w_1 \sim \frac{1}{r_1^2}.$$

Тогда плотность потока энергии I_1 будет обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$I_1 \sim \frac{1}{r_1^2}.$$

Соответственно для расстояния r_2 :

$$I_2 \sim \frac{1}{r_2^2}.$$

Значит, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$, отсюда $I_2 = I_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$.

$$I_2 = 0,4 \left(\frac{300}{1,2 \cdot 10^5}\right)^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 2,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$2,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

3. В катушке индуктивности при изменении в ней силы тока на 2 А за время 1,2 с возникает ЭДС индукции 0,4 мВ. На какую длину волны будет настроен колебательный контур с этой катушкой, если плоский воздушный конденсатор контура имеет следующие параметры: площадь пластины 50 см², расстояние между его пластинами 3 мм?

Дано:	СИ	Решение.
$\Delta I = 2 \text{ А}$		Скорость волны, ее длина и период колебаний связаны соотношением:
$\Delta t = 1,2 \text{ с}$		$v = \frac{\lambda}{T}$. Период колебаний в колебательном контуре находят по формуле Томсона:
$\mathcal{E} = 0,4 \text{ мВ}$	$0,4 \cdot 10^{-3} \text{ В}$	$T = 2\pi\sqrt{LC}$. Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС самоиндукции, возникающая в замкнутом контуре, по модулю равна:
$S = 50 \text{ см}^2$	$50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$d = 3 \text{ мм}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	
$\varepsilon = 1$		
$\lambda - ?$		

$$\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Отсюда получим, что индуктивность катушки в контуре равна $L = \frac{\mathcal{E}\Delta t}{\Delta I}$. Электроемкость плоского конденсатора вычисляют по формуле: $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$. Тогда $\lambda = vT = 2\pi v \sqrt{\frac{\mathcal{E}\Delta t}{\Delta I} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}}$. Подставив численные значения, получим, что $\lambda = 112 \text{ м}$.

$$(\lambda = 112 \text{ м})$$



Упражнение 13

1. Объемная плотность энергии электромагнитной волны $2 \cdot 10^{-16} \text{ Дж/см}^3$. Найдите плотность потока излучения.

Ответ: 0,06.

2. Допустимая объемная плотность энергии электромагнитной волны $2,2 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м}^3$. Найдите максимальную напряженность электрического поля волны в воздухе и ее интенсивность.

Ответ: 5 В/м; $6,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

3. Мощность импульса радара 100 кВт. Найдите максимальную напряженность электрического поля волны в точке, где площадь поперечного сечения конуса излучения 2,3 км².

Ответ: 4 В/м.

4. Плотность энергии электромагнитной волны в определенной пространственной точке в заданный момент времени $w = 5,2$ мкДж/м³. Оцените значения модулей в тот же момент времени и в той же точке, полагая, что $\epsilon_0 \approx 8,9 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Ответ: 2,6 мкТл; $0,76 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

5. Какова плотность энергии электромагнитной волны в фиксированной точке пространства и в тот момент времени, где и когда модуль ее электрического вектора $E_m = 0,3$ кВ/м? Принять $\epsilon_0 \approx 8,9 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Ответ: $w = \epsilon_0 E^2 = 0,4$ мкДж/м³.

6. На какое расстояние распространится электромагнитная волна за время, равное 30 периодам колебаний ее электрического и магнитного векторов, если частота их колебаний составляет 15 МГц?

Ответ: $l = 600$ м.

7. Фаза колебаний электрического и магнитного векторов электромагнитной волны вдоль направления ее распространения определяется выражением $\varphi = 2\pi\nu\left(t - \frac{r}{c}\right)$, где r — расстояние от источника колебаний. Покажите, что две пространственные точки, для которых разность фаз колебаний $\Delta\varphi = 2\pi\nu$, находятся на расстоянии $\Delta r = cT = \lambda$ друг от друга.

Ответ: $\Delta\varphi = 2\pi\nu \frac{\Delta r}{c}$ рад, $\Delta r = \lambda$ при $\Delta\varphi = 2\pi$.

8. На какую длину волны настроен колебательный контур, если он состоит из катушки индуктивностью $2 \cdot 10^{-3}$ Гн и плоского конденсатора? Расстояние между пластинами конденсатора 1 см, диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего пространство между пластинами, равна 11, площадь пластин 800 см².

Ответ: 2350 м.

9. При изменении силы тока в катушке индуктивности на 1 А за время 0,6 с в ней возбуждается ЭДС, равная 0,2 В. Какую длину будет иметь радиоволна, излучаемая генератором, контур которого состоит из этой катушки и конденсатора емкостью 14 100 пФ?

Ответ: 77 500 м.

10. Энергия электромагнитных колебаний в колебательном контуре $W = 0,5$ мДж, частота колебаний $\nu = 400$ кГц, максимальный заряд конденсатора $q_0 = 50$ нКл. Определите индуктивность катушки, включенной в данный контур.

Ответ: 0,06 Гн.

11. Определите давление электромагнитной волны с амплитудой электрического вектора $E_m = 0,2$ мВ/м на стенку, полностью поглощающую волну. Волна падает по нормали к стенке. Принять $\epsilon_0 \approx 8,9 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Ответ: $p = \epsilon_0 \frac{E_m^2}{2} = 1,8 \cdot 10^{-19}$ Па.

§23. Свойства электромагнитных волн



Ключевые понятия:

- ✓ поляризованная волна
- ✓ интерференция волн
- ✓ дифракция волн

На этом уроке вы:

- научитесь описывать свойства электромагнитных волн.



Свойства электромагнитных волн исследуют, используя специальный генератор, излучающий электромагнитную волну длиной 3 см. Возбуждаемая высокочастотным генератором электромагнитная волна с помощью антенны в виде рупора распространяется в направлении его оси. Приемная антенна имеет такой же вид, что и передающая. Кристаллический диод преобразовывает высокочастотный переменный ток, возбуждаемый в приемной антенне, в однополярный пульсирующий ток. После усиления ток передается в громкоговоритель или регистрируется в гальванометре. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 23.1.



Рис. 23.1

Отражение электромагнитных волн. Если поставить между передающим и приемным рупорами металлический лист, то звук не слышен. Электромагнитная волна не проходит через металлический лист — отражается. Если рупор генератора направить, как показано на рисунке 23.2, то приемная антенна принимает электромагнитную волну, отраженную под углом, равным углу падения волны. Это заметно по слышимости звука. Легко понять отражение электромагнитной

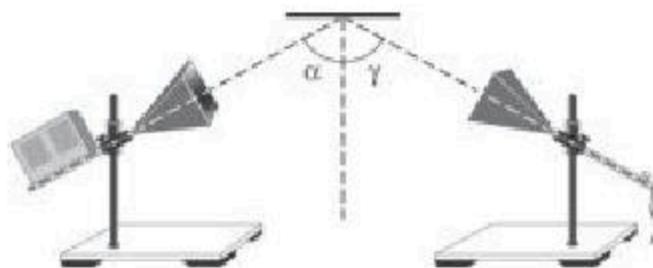


Рис. 23.2

волны от поверхности металла. При падении электромагнитных волн на поверхности металла возбуждаются вынужденные колебания свободных электронов. Частота вынужденных колебаний равна частоте электромагнитной волны. Энергия падающей на поверхность металла электромагнитной волны расходуется на возбуждение вынужденных колебаний свободных электронов в металле. Волна не может пройти через металл, поверхность металла становится вторичным источником волн, т. е. волна отражается от нее. Отражение от диэлектриков слабое, так как в диэлектрике возбуждаются вынужденные колебания связанных электронов. Но амплитуда их вынужденных колебаний намного меньше амплитуды вынужденных колебаний свободных электронов в металле, поэтому отражение волн от диэлектрика слабее.

Отражательная способность электромагнитных волн используется в системе радиосвязи, в радиолокации.

Преломление электромагнитных волн. Преломление электромагнитных волн можно наблюдать с помощью треугольной призмы, наполненной парафином. Направим рупор передающей антенны, как показано на рисунке 23.3. Приемная антенна не регистрирует волну. Теперь сделанную из диэлектрика-парафина призму расположим так, как показано на рисунке, и антенна регистрирует волну. Значит, электромагнитная волна при переходе через границу двух сред воздух — парафин и парафин — воздух преломилась. Выполнение закона преломления при переходе из одной среды в другую подтвердили и экспериментальные исследования.

Поглощение электромагнитной волны. Поместив между рупорами различные диэлектрики, например, фанеру, плексиглас и т. п., можно обнаружить поглощение волн. Степень поглощения неодинаковая у различных диэлектриков.

Поляризация электромагнитных волн. Взаимная перпендикулярность векторов \vec{E} и \vec{B} электромагнитной волны и перпендикулярность их направлению распространения волны показывают, что электромагнитные волны являются поперечными. Колебания

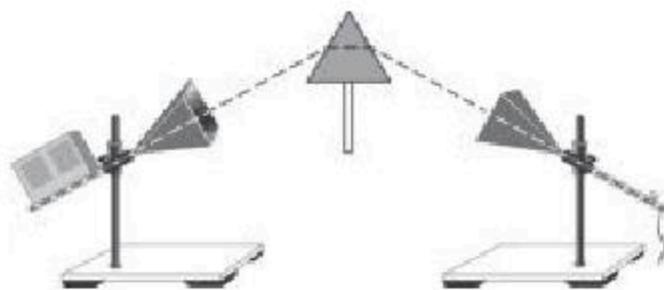


Рис. 23.3

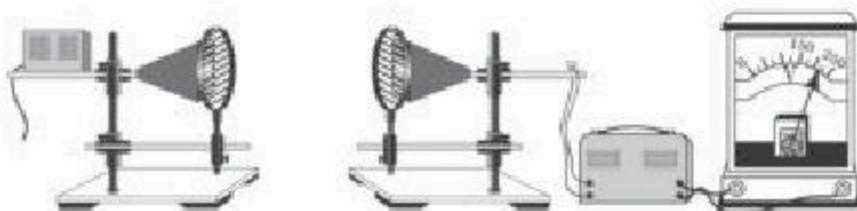


Рис. 23.4

вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны, излучаемой передающей антенной, происходят в определенной плоскости. А колебания вектора индукции магнитного поля \vec{B} происходят в перпендикулярной ей плоскости. Волна, колебания поля которой происходят в одной плоскости, называется **поляризованной волной** (поляризация от лат. *polus*, греч. *polos* — “полюс”, “конец оси”).

Между рупором передающей и рупором приемной антенны установим сетки из металлических стержней (рис. 23.4). Располагая обе сетки вертикально или горизонтально, регистрируем прохождение волны через гальванометр. Это соответствует перпендикулярности вектора напряженности электрического поля к прутьям сетки. Если вторую сетку повернуть на 90° , то волна не проходит через сетку. Это значит, что электромагнитная волна — это поперечная волна.

Когда вектор напряженности электрического поля направлен параллельно металлическим прутьям, в них возбуждаются вынужденные колебания свободных электронов и волна отражается. Когда вектор напряженности направлен перпендикулярно прутьям, вынужденные колебания свободных электронов поперечны, их амплитуды незначительны и электромагнитная волна проходит без отражения. Надо отметить, что если электромагнитные волны продольны, они проходят через прутья без потерь при любом положении сеток. При установке комнатной телевизионной антенны надо учесть поляризованность электромагнитной волны. Амплитуда возбуждаемого индукционного тока в антенне максимальна, когда вектор напряженности параллелен антенне.

Интерференция электромагнитных волн. Излученные из двух или более антенн электромагнитные волны в пространстве накладываются друг на друга. Явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух волн с одинаковыми частотами называется *интерференцией волн*.

При достижении одной и той же точки пространства двух электромагнитных волн, колеблющихся в одинаковой фазе, в результате

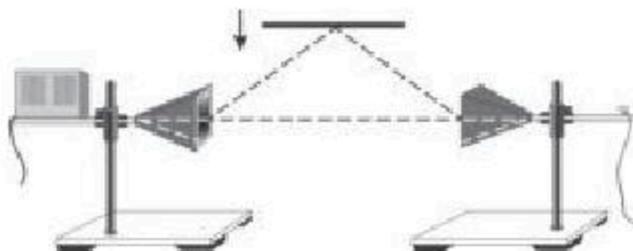


Рис. 23.5

интерференции амплитуда результирующего колебания будет максимальной при выполнении условия:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

где $\Delta l = l_2 - l_1$ — разность хода волн; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Если разность хода волн

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

то наблюдается минимум интерференции. Амплитуда результирующего колебания в этой точке будет минимальной. Для наблюдения интерференции электромагнитных волн рупоры передающей и принимающей антенн направим противоположно друг другу, как показано на рисунке 23.5, и начнем двигать горизонтально расположенный металлический лист сверху вниз. Мы услышим то усиливающийся, то ослабляющийся звук. Часть волны, исходящая из рупора, попадает в принимающую антенну. Остальная часть попадает туда, отразившись от металлического листа. Передвигая металлический лист вверх или вниз, изменяем разность хода прямой и отраженной волн. В зависимости от того, какое из условий интерференции максимума или минимума выполняется, звук усиливается или ослабляется.

Дифракция электромагнитных волн. *Отклонение волн от прямолинейного распространения, или огибание волнами препятствий, называется дифракцией.* Дифракция волн проявляется особенно отчетливо в случаях, когда размеры препятствий соизмеримы с длиной волны. Дифракцию электромагнитных волн наблюдают на установке, показанной на рисунке 23.6. Между генератором сверхвысоких частот и



Рис. 23.6

приемником находится металлический экран с узкой щелью. Изменяя местоположение приемника, можно заметить чередования максимумов и минимумов амплитуды колебания. Это возможно лишь в результате дифракции волн, огибающих края щели. Это означает, что электромагнитные волны огибают препятствие. (Явление дифракции будет рассмотрено в разделе “Оптика” более подробно.)



1. Объясните, почему электромагнитные волны хорошо отражаются от поверхности металлов, а от поверхности диэлектриков отражаются слабо?
2. Как можно объяснить изменение направления электромагнитной волны при переходе из одной среды в другую?
3. Какая волна называется поляризованной?
4. Как можно установить поперечность электромагнитной волны экспериментально (на практике)?
5. Что называется интерференцией волн? Когда выполняются условия ее максимума и минимума?
6. При выполнении какого условия хорошо наблюдается явление дифракции в электромагнитной волне?
7. Наблюдается ли явление дифракции, когда выполняется условие $d > \lambda$, где d — размеры препятствия, λ — длина волны?

§ 24. Принцип радиосвязи



Ключевые понятия:

- ✓ модуляция
- ✓ несущие частоты
- ✓ детектирование

На этом уроке вы:

- изучите модуляцию и детектирование высокочастотных электромагнитных колебаний.



Простейшая схема радиосвязи показана на рисунке 24.1. По этой схеме осуществляют основной физический принцип радиосвязи. В передающей радиостанции возбуждаемый в антенне генератором вы-

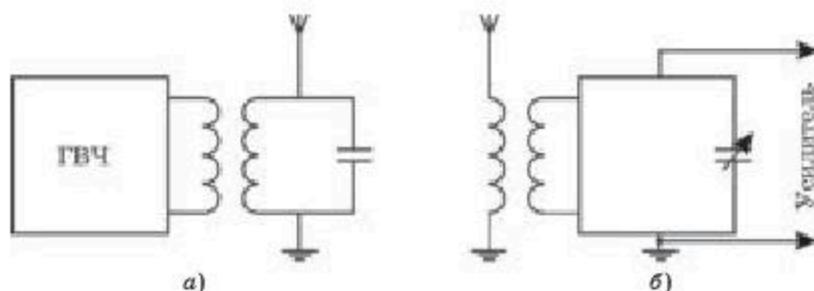


Рис. 24.1



А.С. Попов
(1859—1906)

соких частот высокочастотный переменный ток создает в окружающем пространстве быстро изменяющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитных волн (рис. 24.1, а). Дошедшие до приемной антенны электромагнитные волны возбуждают переменный ток такой же частоты, на которой работает передающая станция. Подключенный к приемной антенне колебательный контур в результате резонанса выделяет вынужденные колебания необходимой нам частоты и усиливает их (рис. 24.1, б).

Изобретение радио. Радиотелеграфная связь.

Опыты Герца впервые доказали возможность распространения электромагнитных волн. В его опытах распространение электромагнитных волн осуществлялось на короткие расстояния в пределах лабораторного стола. На возможность распространения волн на дальние расстояния сам Герц смотрел с некоторым недоверием. Впервые возможность беспроводной связи с помощью электромагнитных волн продемонстрировал русский ученый А.С.Попов на заседании Русского физико-химического общества 7 мая 1895 г. Попов использовал для регистрации электромагнитных волн надежный и чувствительный прибор — *когерер* — вместо малочувствительного искрового приемного вибратора Герца. Он был изобретен французским физиком Э. Бранли.

Когерер представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами. Он заполнен металлическими опилками. В обычных условиях сопротивление прибора очень высокое, так как опилки плохо контактируют между собой. Приемник Попова состоит из когерера *К*, электромагнитного реле *ЭМ*, электрического звонка *З* и источника тока (рис. 24.2). Вначале Попов использовал свой приемник для регистрации электромагнитных волн, возникающих во время электрических разрядов в молниях. Он назвал его *регистратор молнии*. Дошедшие до антенны высокочастотные электромагнитные волны вызывают вынужденные колебания свободных электронов,

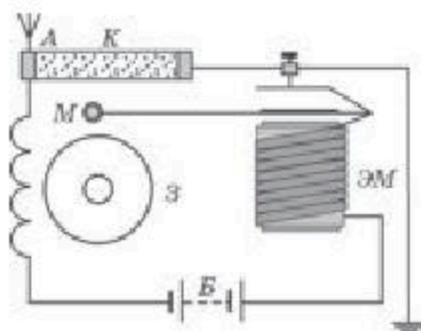


Рис. 24.2

переменный ток. Между опилками проскакивают искорки, за счет которых происходит спекание опилок. Сопротивление когерера падает резко в 100—200 раз. В обычном состоянии сопротивление его очень большое, поэтому реле не может подключить цепь звонка к источнику тока. Теперь, когда электромагнитные волны дойдут до антенны, цепь звонка

замыкается через прибор. Молоточек ударяет когерер и сообщает о приеме электромагнитной волны. После приема электромагнитной волны цепь звонка выключается, так как молоточек ударяет одновременно со звонком и когерер. При встряхивании когерера его первоначальное состояние восстанавливается, сопротивление вновь увеличивается, и прибор снова готов к приему очередной волны.

Чтобы увеличить чувствительность приемника, Попов один конец когерера заземлил, а второй соединил с проводником, поднятым высоко вверх. Тем самым он создал первую приемную антенну.

В 1896 г. Попов создал передатчик электромагнитных волн. Совершенствуя передатчик и приемник электромагнитных волн, он начал передавать и принимать радиogramмы, используя азбуку Морзе. 24 марта этого же года он впервые в мире передал радиogramму из двух слов: “Генрих Герц” — на расстояние 250 м, принял их, тем самым показав на практике, что слова можно принимать и по телеграфу. Этот вид связи назвали *радиотелеграфной связью*. Телеграфные сообщения передаются короткими и длинными импульсами электромагнитных волн, т. е. передаются с помощью точки и тире азбуки Морзе.

В развитие и практическое применение радиотехники огромный вклад внес итальянский изобретатель Г.Маркони. В 1897 г. он получил патент на использование электромагнитных волн для беспроводной связи. В 1901 г. Г.Маркони впервые осуществил радиосвязь между Европой и Америкой через Атлантический океан. В развитии радио как средства связи он сыграл исключительную роль. А.С.Попов, к сожалению, не запатентовал свое открытие.

Радиотелефонная связь. Важнейшим событием в развитии радиосвязи является изобретение в 1906 г. американским инженером Д. Форесом *триода* — трехэлектродной электронной лампы. На основе триода в 1913 г. им был создан ламповый генератор незатухающих электрических колебаний. Теперь стало возможным с помощью электромагнитных волн передавать и музыку, и речь на дальние расстояния. Этот вид связи назвали *радиотелефонной связью*. Осуществить радиотелефонную связь кажется совершенно легко. Создаваемые звуковыми волнами колебания давления воздуха в микрофоне преобразуются в

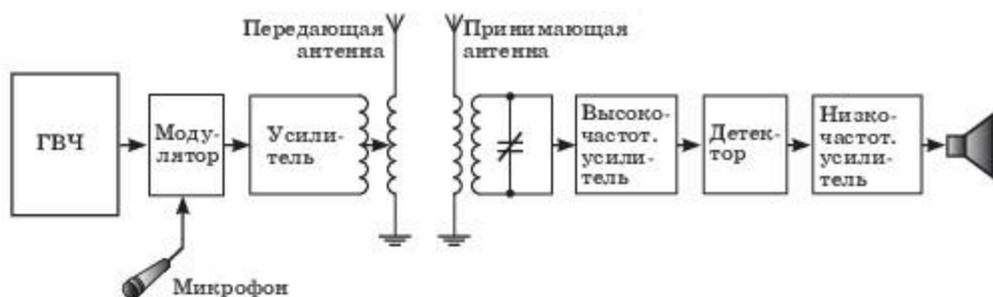


Рис. 24.3

точно такие же электрические колебания. Усилив их, можно вызвать в антенне вынужденные колебания звуковой частоты переменного тока. Таким путем радиотелефонную связь осуществить невозможно. Вспомним, что интенсивность излучаемых антенной электромагнитных волн пропорциональна четвертой степени частоты $I \sim \omega^4$.

Трудность в передаче звука такова: для радиосвязи необходимы высокочастотные электрические колебания, а звуковые колебания являются низкочастотными. Электромагнитные волны такой низкой частоты не излучаются, значит, не могут распространяться в пространстве. Поэтому надо искать способ передачи низкочастотных электромагнитных колебаний с помощью высокочастотных электромагнитных колебаний.

Для передачи звука эти высокочастотные колебания изменяют или, как говорят, модулируют с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты. Под **модуляцией** подразумевается процесс медленного изменения одного из параметров высокочастотных электромагнитных колебаний — амплитуды, частоты или фазы — в соответствующий параметр электромагнитных колебаний низкой (звуковой) частоты. В радиотехнике используются амплитудная, частотная и фазовая модуляция. Колебания высокой частоты называют **несущими частотами**, так как они играют роль носителей колебаний звуковой частоты. В современной радиотехнике, системах космической связи и на телевидении всегда используют частотную модуляцию. В радиоприемнике из сложных высокочастотных колебаний заново выделяют, отделяют низкочастотные колебания. Восстановление низкочастотных сигналов называется **демодуляцией**, или **детектированием**. Детектированные сигналы после усиления преобразуются в акустические колебания. На рисунке 24.3 показана принципиальная схема радиосвязи, содержащая основные модули.



1. Какие принципы радиосвязи называются основными?
2. Из каких частей состоит первый приемник — регистратор молний А. С. Попова?
3. На каком физическом принципе основана работа когерера?
4. Какую роль играет электрический звонок в приемнике Попова?
5. Почему один конец когерера Попов заземлил, а другой присоединил к антенне?
6. Как осуществляется радиотелеграфная связь?
7. Почему невозможно осуществлять радиосвязь на низкочастотных радиоволнах?
8. Какой вид связи называют радиотелефонным?
9. В чем значимость открытия Г. Маркони?
10. Что называется модуляцией?



Почему в память о Маркони, лауреата Нобелевской премии за 1909 г., 20 июня 1937 г. радиостанции всего мира на 2 минуты прекратили вещание?

§ 25. Модуляция и детектирование



Ключевые понятия:

- ✓ амплитудная модуляция
- ✓ частотная модуляция
- ✓ детектирование

На этом уроке вы:

- научитесь различать амплитудную (АМ) и частотную модуляции (FM);
- объясните принцип работы детекторного приемника.



Высокочастотные колебания можно модулировать, изменяя амплитуду, частоту или фазу. На практике применяются все три способа модуляции. Мы остановимся на более распространенном способе — амплитудной модуляции.

Амплитудная модуляция. При амплитудной модуляции амплитуду высокочастотных колебаний изменяют в соответствии со звуковой частотой. Модуляцию амплитуды высокочастотных колебаний, получаемых транзисторным генератором, можно осуществить, используя схему, показанную на рисунке 25.1.

Модулятор состоит из микрофона M , источника тока B_1 и последовательно соединенной первой обмотки L_1 трансформатора T_p . Вторая обмотка трансформатора L_2 соединена параллельно с конденсатором C в цепи базы транзистора в контуре. Конденсатор C оказывает малое сопротивление высокочастотному переменному току, протекающему через обмотку (виток) обратной связи катушки. Индуктивное сопротивление второй обмотки трансформатора L_2 высокое. Поэтому производимый генератором высокочастотный ток легко проходит через конденсатор C , но не может пройти через микрофонную цепь модулятора.

При отсутствии звуковых колебаний генератор производит высокочастотные, гармонические колебания постоянной амплитуды:

$$i_1 = i_0 \sin \omega t,$$

где ω — несущая частота; i_0 — постоянная амплитуда колебаний. (Смотрите график этих колебаний, показанный на рис. 25.2, а.)

При включении микрофона звуковые волны вызовут в его цепи электрический ток низкой частоты (рис. 25.2, б). Конденсатор C для этих токов оказывает большое сопротивление. По этой причине напряжение на концах обмотки трансформатора L_2 полностью приложится на участок цепи база — эмиттер. Благодаря этому амплитуда переменного тока высокой частоты в цепи контура генератора непрерывно меняется в такт звуковым частотам, т. е.

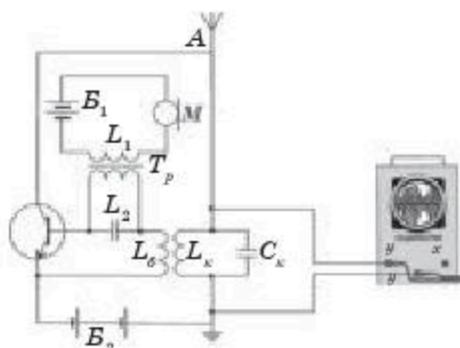


Рис. 25.1

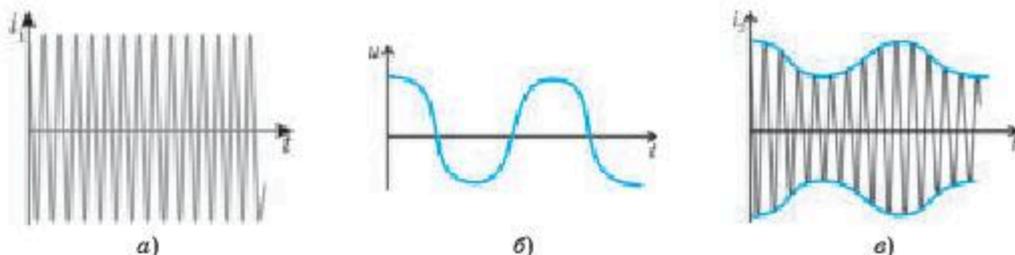


Рис. 25.2

осуществляется модуляция колебаний высокой частоты. Это можно наблюдать на экране осциллографа, включенного в контур (рис. 25.2, в).

Частотная модуляция (FM-frequency modulation). Вышеуказанная амплитудная модуляция имеет существенный недостаток. Если расстояние между передатчиком и приемником большое, то высокочастотная модулированная электромагнитная волна ослабнет, и ослабленная волна начнет изменяться по времени. Когда радиоволна проходит через атмосферу, выделение изменений амплитуды от необходимой модуляции станет невозможным из-за воздействия чрезмерных сопротивлений (шум, звуки). Для устранения этих сопротивлений используется частотная модуляция (рис. 25.3).

При частотной модуляции изменяется частота, а не амплитуда высокочастотных колебаний. Частота передатчика радиоволны, передаваемой для усиления защиты от помех, пропорциональна амплитуде звукового колебания. Чем сильнее звуковая волна, тем выше несущая частота и наоборот. Передача звуковых волн на радиостанциях и телевидении происходит через частотную модуляцию.

Детектирование. В антенне радиоприемника электромагнитные волны от всех передатчиков — разрядов молний, искровых разрядов при работе с приборами и электрическими двигателями и т. д. — возбуждают слабые индукционные токи высокой частоты. Поэтому, чтобы слушать выбранное радиосообщение, выделяют волну необходимой частоты, включив в цепь колебательный контур. Это осуществляется

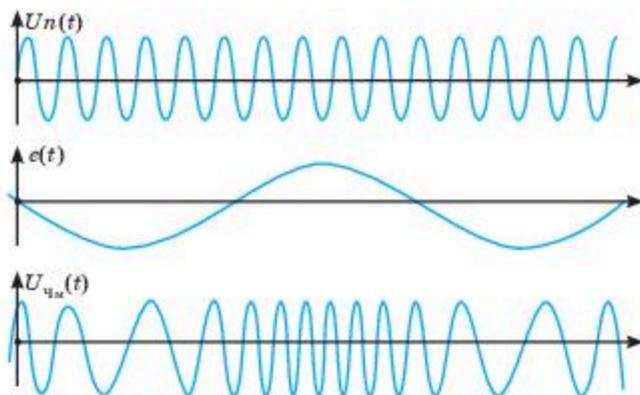


Рис. 25.3

изменением емкости конденсатора в колебательном контуре: изменяя емкость конденсатора, добьемся равенства собственной частоты колебательного контура частоте вынужденных колебаний, возбужденных в антенне, другими словами, добьемся резонанса. Из поступившей в антенну модулированной электромагнитной волны необходимо выделить из сложного сигнала колебания звуковой частоты. Демодуляция, или детектирование, осуществляется прибором односторонней проводимости — *детектором*. В качестве детектора можно использовать полупроводниковый диод или транзистор.

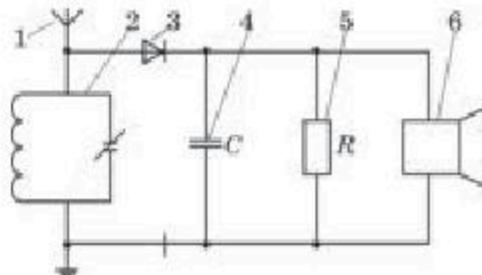


Рис. 25.4

Рассмотрим принцип работы простейшего радиоприемника или детекторного радиоприемника. Модулированные высокой частоты колебания из антенны (1) через резонансный контур (2) поступают в детектор (3) (рис. 25.4). В цепи детектора возбуждается электрический ток в форме кратковременных импульсов различной амплитуды, график которого показан на рисунке 25.5 (а, б). Чтобы преобразовывать подобный ряд импульсов в переменный ток звуковой частоты, используют конденсатор (4) и резистор (5). Через каждые полпериода импульс высокочастотного тока заряжает конденсатор, а между импульсами конденсатор разряжается через резистор. Если подобрать емкость конденсатора и сопротивление резистора, то через резистор проходит переменный ток с частотой, равной звуковой частоте передающей станции. В громкоговорителе или на мембране телефона эти звуки воспроизводятся.



Рис. 25.5

1. Что такое амплитудная модуляция?
2. Объясните принцип работы установки, возбуждающей модулированные колебания высокой частоты.
3. Как работает модулятор?
4. Для чего нужна антенна в радиоприемнике?
5. Как можно принять волну нужной радиостанции?
6. С какой целью применяют детектор?
7. Нарисуйте схему простейшего детекторного радиоприемника.
8. Объясните назначения конденсатора C и резистора R на рисунке 25.4.

§ 26. Распространение радиоволн. Радиолокация



Ключевые понятия:

- ✓ радиоволны
- ✓ радиолокация

На этом уроке вы:

- объясните принцип радиосвязи;
- выясните, в чем причина появления ионосферы.



Используемые в радиовещании, телевидении, радиосвязи, радиолокации и радионавигации электромагнитные волны называют *радиоволнами*. Радиоволны разделяются на несколько диапазонов, как показано в таблице 26.1.

Таблица 26.1

Диапазоны волн

Диапазон длины волн	Типы антенн	Влияние ионосферы и атмосферы	Физические явления, используемые для связи
Километровые волны (>1000 м)	Мачтовые	Поглощаются ионосферой	Дифракция волн, огибание выпуклой поверхности Земли
Гектометровые волны (100—1000 м)	Мачтовые	Отражаются ионосферой	Отражение от ионосферы
Декаметровые волны (10—100 м)	Мачтовые	Отражаются от ионосферы и поверхности Земли	Множественные отражения от атмосферы и земной поверхности
Метровые волны (1—10 м)	Возможно создание направленных антенн	Не отражаются от ионосферы	Передача на расстоянии прямой видимости
Дециметровые и сантиметровые волны (10 см — 1 мм)	Параболические зеркальные антенны	Не отражаются ионосферой, прохождение зависит от прозрачности атмосферы (туман)	Сверхдальний прием с помощью спутников и метеорных следов
Миллиметровые и субмиллиметровые волны (1 мм и ниже)	Параболические антенны с высоким качеством поверхности	Зависит от пропускания атмосферных газов	Применяются в радиоастрономии

Различные антенны, применяемые для различных диапазонов длин волн, имеют свои особенности. Длинные, средние и короткие волны, применяемые в радиовещании, излучают вертикально направленные проводники — *вибраторы*. Чтобы увеличить расстояние приема, антенны стараются располагать повыше. Для радиолокации, космической радиосвязи и телевидения используют ультракороткие волны.

Антенна, собранная из вибратора длиной, равной половине длины волн, или из нескольких таких вибраторов, излучает направленное

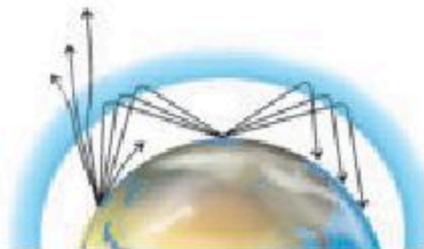


Рис. 26.1

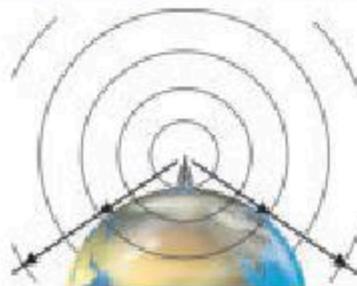


Рис. 26.2

метровое электромагнитное излучение. Для излучения радиоволн в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн применяют параболические отражатели.

На распространение радиоволн сильное влияние оказывает рельеф земной и водной поверхностей, особенно верхний слой атмосферы — ионосфера. Ионосфера образует на высоте 90—300 км от поверхности Земли газовый слой, состоящий из электронов и ионов. Ионизация верхних слоев атмосферы происходит в основном из-за действия солнечных, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей. Днем концентрация ионов в 20 и более раз выше, чем ночью. Поэтому свойства ионосферы изменяются в течение суток и в зависимости от сезонов. Ионосфера может отражать и поглощать электромагнитные волны. Длинные радиоволны в результате дифракции распространяются далеко за горизонт. Они хорошо отражаются от ионосферы, поэтому длинные волны могут распространяться на большие расстояния, огибая всю поверхность Земли.

Распространение коротких волн на большие расстояния происходит благодаря отражению несколько раз от земной поверхности и ионосферы. На коротких волнах можно установить радиосвязь с любыми радиостанциями, находящимися на Земле (рис. 26.1).

Ультракороткие радиоволны, не отражаясь от ионосферы, без сопротивления проходят через нее. Их дифракционные свойства слабые, поэтому ультракороткие волны почти не огибают поверхность Земли. В связи с этим на ультракоротких волнах связь осуществляется в районе прямой видимости передающей антенны (рис. 26.2).

Радиолокация. Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называется **радиолокацией**. В основе радиолокации лежит способность проводящих тел отражать радиоволны. Это более заметно, когда линейные размеры объектов, отражающих радиоволны, больше длины волн. Поэтому на радиолокационных станциях используют ультракороткие волны.

Для нахождения объекта в радиолокации используют сходящепараллельный пучок электромагнитных волн. В радиолокаторах, работающих на дециметровых и еще более коротких волнах, направленную волну излучают антенны, расположенные в фокусе параболических

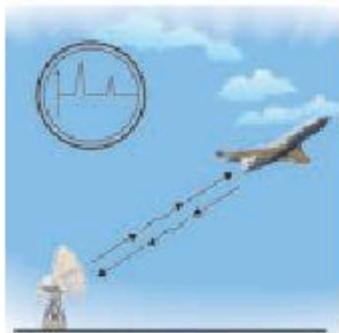


Рис. 26.3

металлических зеркал. Чтобы направленно излучать метровые волны, используют систему антенн, расположенных в определенном порядке. Если на одном направлении из-за интерференции волны, усиливаясь, направляются сфокусирующе, то на других направлениях они гасят друг друга полностью или частично.

Радиолокатор (или радар-излучатель и радар-приемник) состоит из сложных радиотехнических систем. Работает он в *импульсном режиме*. Для определения местонахождения

самолета антенну радиолокатора направляют туда, а генератор излучает кратковременные периодические импульсы электромагнитных волн (рис. 26.3). Длительность каждого импульса порядка $t = 10^{-6}$ с, а промежуток между ними $t = 10^{-3}$ с, т. е. в 1000 раз больше. Отраженную от объекта электромагнитную волну принимает антенна, переключенная от излучателя к приемнику в промежутках между ними. Измеряя время t , затраченное электромагнитной волной до объекта и обратно, определяют расстояние:

$$l = c \cdot \frac{t}{2},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость радиоволны в воздухе.

На экране радара наблюдают отклонения электромагнитного тока, соответствующие импульсам излученных и отраженных электромагнитных волн, и непосредственно измеряют расстояние. Промежутки на экране, соответствующие импульсам отклонений, прямо пропорциональны времени прохождения волны t и расстоянию l до объекта. Антенна радиолокатора может поворачиваться в любом направлении. По углу поворота антенны, например, определяют направление полета самолета, его координаты. По изменениям координаты по времени рассчитывают скорость цели и ее траекторию.

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. Радиолокаторы используют для обнаружения самолетов, кораблей, в метеорологии, для локации планет и др. Радары могут следить за целями в сотнях километров от себя. С помощью радиолокаторов следят за взлетами и посадками самолетов на аэродромах, движением на воздушных трассах, дают пилотам необходимые указания, обеспечивая безопасность полетов.

Поверхность Земли, городские здания, транспортные коммуникации, вода по-разному отражают радиоволны. Летчик в самолете с помощью радиолокационных приборов узнает не только расстояние до поверхности Земли, скорость движения, но еще и видит радиолокационную карту земной поверхности. Такие сведения он получает и в дневное время.

Радиолокация применяется в космических исследованиях и астрономии. Принимая с помощью радиотелескопов (рис. 26.4) электромагнитные волны невидимого диапазона от сверхдалеких космических тел, ученые стали изучать структуру Вселенной. На основе радиолокационных методов смогли точно определить расстояния от Земли до Луны, Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера.



Рис. 26.4

Все космические корабли снабжены несколькими радиолокаторами. Они могут показать непосредственно видовую карту планет, а также дать информацию о небесных телах.



1. Назовите границы всех диапазонов радиоволн.
2. Почему длинные радиоволны могут распространяться на большие расстояния?
3. Как осуществляется радиосвязь на сверхдалекие расстояния короткими волнами?
4. В чем причина появления ионосферы?
5. Почему качество радиосвязи коротких волн меняется в зависимости от времени года и суток?
6. Почему передающие антенны для телевидения должны располагаться высоко?
7. Что называется радиолокацией?
8. Объясните принцип работы радиолокатора.
9. Как определяют координаты тела в пространстве, расстояние до него, его скорость?



Подготовьте презентацию на темы: 1. Развитие радиолокации. 2. Применение радиолокации. 3. Радиотелескопы. Раскрывая тему реферата, постарайтесь рассказать о том, какой вклад внесли ученые Казахстана.

Пример решения задачи

Радиолокатор работает на длине волны 15 см и испускает импульсы частотой 4 кГц. Длительность каждого импульса $t = 2$ мкс. Найдите самое большое расстояние для определения объекта. Сколько колебаний в одном импульсе? Какова частота электромагнитных колебаний радиоволны?

Дано:

$$\lambda = 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м}$$

$$\nu_{\text{имп.}} = 4 \text{ кГц} = 4 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

$$\tau = 2 \text{ мкс} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$l_m = ?$$

$$N_{\text{колеб.}} = ?$$

$$\nu_{\text{колеб.}} = ?$$

Решение. Для определения расстояния до объекта используем формулу:

$$l_m = ct,$$

где t — время распространения радиоволны. Далее, $t_{\text{об.}}$ — время, за которое радиоволна доходит от радара до объекта, и, отразившись, возвращается обратно:

$$t_{\text{об.}} = 2t. \text{ Отсюда}$$

$$t = \frac{t_{\text{об.}}}{2} \text{ и } l_m = c \cdot \frac{t_{\text{об.}}}{2}.$$

Радиолокатор работает в импульсном режиме, т. е. за время τ испускает радиоволны и за время $t_{об.}$, распространяясь в пространстве, доходит до объекта, отражается, возвращается обратно и только после этого испускает следующий импульс.

$$\text{Поэтому } t_{об.} = \frac{t}{N_{имп.}} = \frac{t}{\frac{t}{T_{имп.}}} = \frac{t}{v_{имп.}}. \text{ Тогда } l_m = \frac{t}{2v_{имп.}}.$$

Мы определили одну из величин. Теперь находим число колебаний $N_{колеб.}$ в импульсе. Оно равно отношению длительности импульса τ к периоду электромагнитного колебания $T_{колеб.}$:

$$N_{колеб.} = \frac{\tau}{T_{колеб.}}$$

Определим период колебания:

$$T_{колеб.} = \frac{\lambda}{c}. \text{ Тогда } N_{колеб.} = \frac{\tau \cdot c}{\lambda}.$$

Теперь находим частоту электромагнитного колебания:

$$v_{колеб.} = \frac{1}{T_{колеб.}} = \frac{c}{\lambda}.$$

$$l_m = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 4 \cdot 10^3} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ м.}$$

$$N_{колеб.} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,15} = 4 \cdot 10^3, \quad v_{колеб.} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,15} = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц.}$$



Упражнение 14

1. Почему нельзя осуществить радиосвязь с помощью электромагнитных волн с подводной лодкой, когда она находится под водой?
2. Возможна ли радиосвязь между двумя подводными лодками, находящимися на глубине в океане?
3. Высота телебашни на горе Коктобе в Алматы — 372 м, высота самой горы — 250 м, приемной антенны — 10 м, радиус Земли — 6400 км. На каком расстоянии можно принимать изображение?

Ответ: 100,5 км.

4. Каково расстояние до объекта, если время прохождения импульса радиолокатора до него и обратно 0,0001 с?

Ответ: 15 км.

5. Рабочая длина волны радиолокатора 5 см, длительность излучаемого импульса 1,5 мкс. Сколько колебаний содержится в каждом импульсе? Какова наименьшая дальность обнаружения цели таким радиолокатором?

Ответ: 3000; 225 м.

6. Антенна радиолокатора корабля расположена на высоте 25 м над уровнем моря. На каком максимальном расстоянии радиолокатор может обнаружить спасательный плот? С какой частотой при этом излучаются импульсы?

Ответ: 18 км; $8,3 \cdot 10^8$ Гц.

- *7. Почему увеличение дальности радиосвязи с космическими кораблями в три раза требует увеличения мощности передатчика в девять раз? Во сколько раз следует увеличить мощность передатчика для увеличения в три раза дальности радиолокации? В обоих случаях излучатель радиоволн можно считать точечным. Поглощение энергии при распространении радиоволн не учитывать.

Ответ: в 81 раз.

§ 27. Цифровые технологии



Ключевые понятия:

- ✓ аналоговый сигнал
- ✓ информационный канал
- ✓ аналогово-цифровое преобразование

На этом уроке вы:

- объясните преимущества передачи сигнала в цифровом формате в сравнении с аналоговым сигналом.



С каждым годом мы все больше внедряемся в мир цифровых технологий и этот процесс со временем все больше ускоряется. Телеграфная и телефонная связи, созданные во второй половине XIX в., радио и телевидение, появившиеся в первой половине XX в. работают на основе аналоговых сигналов. В процессе работы телефона и телеграфа сигналы передаются от одного объекта к другому электрическим током в виде импульсов в проводящих сетях. В настоящее время каналы связи распространяют информацию различными типами сигналов, среди них основными являются цифровые и аналоговые сигналы.

Сигнал (по латыни *signum* — “знак”) — физический процесс, переносящий данную информацию. Электрический сигнал — электрический ток или напряжение, параметры которого изменяются по закономерности информации.

Аналоговый сигнал непрерывен и изменения его параметров со временем зависят от частоты, фазы и амплитуды информационного сигнала. Форма его является синусоидой.

Остановимся на некоторых особенностях распространения информации через аналоговый сигнал.

1. Форма аналогового сигнала сложная.

2. Трудно исправить искаженный аналоговый сигнал, в некоторых случаях это невозможно.

3. Восстановление аналоговых сигналов, которые чувствительны к внешним сопротивлениям, трудно, их можно только усилить.

4. Сжатие и группировка канала связи определяется частотой.

5. Обслуживание потребителей ограничено.

6. Элементные базы сложные и т. д.

Человек воспринимает информацию, поступающую из окружающей среды, через органы чувств. Свет, тепло и звук — это энергетические сигналы, а вкус и запах — это действие химических соединений, естественно, их природа тоже энергетическая. Мы непрерывно чувствуем энергетическое воздействие, и вся эта информация является аналоговой.

Человек разговаривает в интервале частот от 80 Гц до 12000 Гц, а слышит в интервале от 16 Гц до 20000 Гц. Звук — это непрерывный аналоговый сигнал. Если звук записать в виде ноты, он превращается в цифровой сигнал. Основное отличие цифрового сигнала от аналогового заключается в том, что аналоговая информация непрерывна, тогда как цифровая информация дискретна. Цифровой сигнал состоит только из двух значений “0” и “1”. Значение электрического напряжения в любой момент времени соответствует одному из двух уровней. Двухуровневый сигнал называют *двухцифровым сигналом*. В двоичной логической схеме один из уровней, а именно верхний, соответствует “1” единице (истина), а второй, нижний — логическому “0” — нулю (ложь). Для хранения большой информации используется также третий уровень NULL “нет итога”.

В цифровых технологиях измерение количества информации имеет свои особенности. Единица измерения информации называется бит (от англ. *binary digit* — “двоичная цифра”).

Бит — единица измерения количества информации в двоичном коде, он равен информации об одном из двух равновероятных положений.

Байт — единица измерения информации, равная 8 битам. 1 байт = 8 бит. В байтах кодируют символы, используемые в компьютерах. Приведем более крупные единицы:

1 Кбайт = 1024 байт;

1 Мбайт = 1024 Кбайт;

1 Гбайт = 1024 Мбайт.

Особенности цифрового сигнала:

1. Чаще 2—3 уровневый.

2. Можно найти ошибку и ее исправить.

3. Цифровые сигналы, ослабленные при передаче, возможно восстановить, затем усилить.

4. Уплотнение и группировка канала связи во времени.

5. Разнообразие видов услуг.

6. Расчет скорости.

7. Высокая возможность использования микросхем.

Приведем пример. При переводе информации, содержащейся в книге в 100 страниц, в цифровой формат, это будет всего $\approx 0,166$ Мбайт. Цифровое вещание информации было осуществлено в начале 70-х годов XX в. При этом для преобразования аналоговых сигналов (например, человеческой речи) использовали импульсно-кодую модуляцию (ИКМ). Основной ее принцип заключается в том, что аналоговый сигнал (рис. 27.1, а) сначала дискретизируется во времени (рис. 27.1, б), потом он квантуется по амплитуде (частоте, фазе) (рис. 27.1, в), после чего квантованные значения амплитуды кодируются в виде двоичных сигналов (рис. 27.1, г).

Максимальная частота спектра телефонных сигналов 3400 Гц и цифровой звуковой сигнал распространяется со скоростью 64 Кбайт/с. Такой канал называется *основным цифровым каналом*. Канал, по которому информация доставляется приемнику называется *информационным каналом*. В тракте связи есть каналы по которым информация передается в преобразованном виде. В компьютерах цифровые технологии используются при преобразовании информации. Информация, поступившая от внешних устройств (диска, клавиатуры и микрофона) преобразуется во внутренний код, обрабатывается и в преобразованном виде поступает опять во внешние устройства — монитор, принтер и динамику.

На рисунке 27.2 приведена схема, где показаны основные модули системы цифровой радиотелесвязи.

Аналоговый звуковой сигнал в микрофоне преобразуется в сигнал электрических колебаний. Преобразование этой информации в цифровой сигнал называют *аналогово-цифровым преобразованием* или *оцифровкой*. Такое преобразование осуществляется в АЦП — аналогово-цифровом преобразователе, т. е. сигнал дискретизируется, квантуется и кодируется. Оцифрованная информация поступает через канал связи в приемник и в цифровом аналоговом преобразователе (ЦАП)

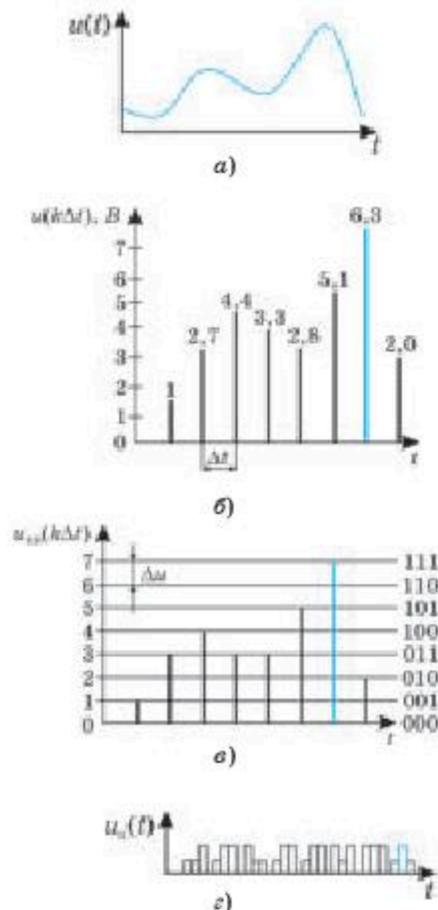


Рис. 27.1. Формирование цифрового сигнала:

а — аналоговый сигнал;
б — дискретизация; в — квантованный сигнал; г — цифровой сигнал



Рис. 27.2

вновь превращается в аналоговый сигнал и передается потребителю. В цифровом радиовещании качество звука особенно четкое и чистое. Еще одно преимущество радиовещания цифровыми технологиями — очень высокое качество сигнала, поступающего в движущиеся радиоприемники и возможность автоматического отбора наиболее сильных сигналов. Наряду с цифровым радиовещанием осуществляется вещание в виде “радиомультимедиа”. Здесь слушателям передается дополнительная информация в дисплей радиоприемника ЦРВ, тесно связанная с телефонами и компьютерами. Передача и прием мультимедийных файлов мобильному телефону осуществляется через ЦРВ. Цифровая технология решила проблему доставки информации в неискаженном чистом виде. В современных компьютерах больших мощностей адаптируемость, алгоритмы звукозаписи и методы архивации настолько совершенны, что звук и мелодии передаются и воспроизводятся практически без искажений и шумов в первоначальном виде. Неоспоримыми преимуществами цифровой технологии являются: как известно, аналоговый звук не может сколько угодно долго храниться в магнитной ленте и его качество ухудшается в случае перезаписи, тогда как цифровой сигнал никогда не теряет своего качества и самопроизвольно не изменяется; компьютерная обработка дает большие творческие возможности; легко достигается многоканальная обработка, добавление дополнительных звуков, изменение уровня звука; очень низок уровень шума; лазерные технологии, технологии CD и DVD являются самыми передовыми методами передачи и сохранения музыки; появилась возможность создания огромного архива музыки и ее передачи: методом MP3 (MPEG-I Layer III) распространяются миллионы песен и других музыкальных произведений; высокие возможности распространения на большие расстояния, цифровая мелодия может в первоначальном виде без всяких искажений проигрываться в любом месте земного шара, очень удобна передача через интернет.

В Казахстане создана и успешно выполняется программа развития цифровой телерадиосвязи. 3 июля 2012 г. был принят стандарт DVB T2. В городах Нур-Султан, Алматы, Караганды, Жезказган, Жана Озен с применением CYD irdeto Cloaked CA состоялось первое эфирное цифровое теле вещание. В городе Алматы и областных центрах работает двух-мультиплексный цифровой канал, он равнозначен 30 каналам SDTV. В других населенных пунктах работает 1 мультиплексный канал, который состоит из 15 информационных каналов. До сих пор параллельно используется аналоговая сеть телерадиовещания национального оператора АО “Казахтелерадио”.

Цифровая технология развивается высокими темпами. Она оказывает огромное влияние на развитие цивилизации.



1. Назовите преимущества и недостатки аналогового сигнала.
2. Обсудите особенности цифрового сигнала.
3. Каким образом используется цифровая технология “Smart—city”?

§ 28. Оптико-волоконные коммуникационные сети

Оптическое волокно (световод) состоит из двухслойного концентрического сердечника и оптического слоя (рис. 28.1).

Сердечник предназначен для передачи света. Показатель отражения оптического слоя вокруг него отличается от показателя преломления сердечника и обеспечивает полное внутреннее преломление в сердечнике. Явление полного внутреннего отражения мы будем изучать в следующих параграфах. Показатель преломления оптического слоя примерно на 1% меньше, чем сердечника. Вокруг оптического слоя располагается дополнительная защитная оболочка. Она выполняется из полимера в один или несколько слоев и защищает волокно от вредных воздействий. На рисунке 28.2 показано распространение света вдоль волокна.

Световой луч падает на границу “ядро — оптическая оболочка” под углом бóльшим, чем предельный угол полного внутреннего отражения и испытывает на границе полное внутреннее отражение. Так как угол падения равен углу отражения, световой луч и дальше на границе будет испытывать полное внутреннее отражение. Таким образом световой луч внутри волокна распространяется по ломаной траектории.

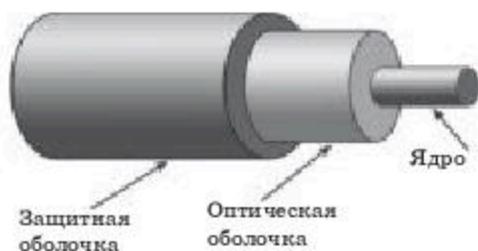


Рис. 28.1. Структура световода

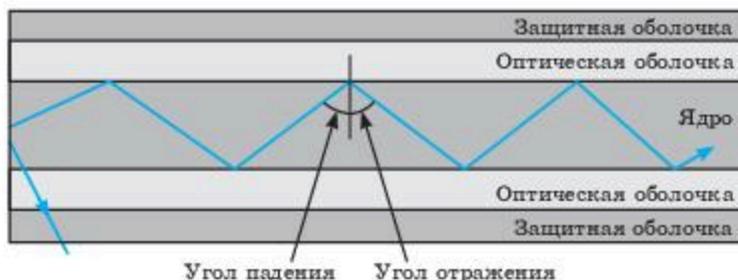


Рис. 28.2. Полное внутреннее отражение в оптическом волокне

Световые лучи, падающие на границу под углами, меньшими чем предельный угол полного внутреннего отражения, преломившись, переходят в оптическую оболочку и там поглощаются. Волоконно-оптическая связь — это вид связи, в котором распространение информации осуществляется с использованием диэлектрического распространителя волны в оптическом диапазоне электромагнитных волн. С появлением лазера в 1960 г. появилась возможность использования электромагнитных волн оптического диапазона в системе связи.

Укажем на некоторые особенности оптического волокна: основу дешевого кварцевого волокна составляет двуокись кремния; диаметр оптического волокна около 100 мкм, т. е. он очень легкий и компактный, поэтому перспективный в авиаприборостроении и кабельной технике; стеклянные волокна не металлические, легкие, поэтому используя прочный пластик, его можно применять в любой среде: в воздухе, под водой и т. д.; системы связи на основе волоконной оптики не чувствительны к негативным электромагнитным действиям, никто не может нелегально использовать информацию, передающуюся по световоду. По волоконно-оптической системе связи посторонние не могут прослушивать информацию. В Казахстане широко развивается технология FTTH (Fiber To The Home). Это оптоволоконный кабель, который проводится в домах и квартирах. В связи с ростом спроса населения на высокоскоростные коммуникационные линии и для расширения спектра услуг в 2011 г. началось строительство линии универсальной оптоволоконной связи. Во многих крупных городах Казахстана сдаются в эксплуатацию линии оптоволоконной связи. Внедрены базовые составляющие предоставления услуг организациям и населению, и создана инфраструктура “электронного правительства”. В качестве примера таких проектов можно назвать электронное лицензирование, оплату налогов и штрафов, электронный нотариат, электронную таможню и т. д.

Развитие всех вышеуказанных услуг, телерадиовещания, распространение информации через Интернет указывают на перспективу развития оптоволоконной связи.



1. Как вы используете интернет-сети в повседневной жизни: дома, в школе?
2. Что вы думаете о цифровой революции?

§ 29. Развитие средств связи в Казахстане



Ключевые понятия:

- ✓ спутниковая связь

На этом уроке вы:

- систематизируете средства связи и предложите возможные пути их совершенствования.



Первая радиостанция в Казахстане была построена в 1913 г. (г. Форт-Шевченко). Мощность искрового передатчика составляла всего 1кВт. С его помощью установили постоянную связь в радиусе 300 км. Эта радиостанция работала в режиме радиотелеграфа.

Во второй половине XX в. система связи в Казахстане развивалась быстрыми темпами. Совершенствовались не только традиционно известные типы связи (телеграф и телефон), но и фототелеграф, радиовещание, телевидение, автоматические телефонные станции, международные и космические системы связи. Раньше междугородная телефонная связь осуществлялась по проводам, закрепленным между столбами. Такая система часто выходила из строя под воздействием окружающей среды, что не способствовало постоянству связи. Поэтому стали широко внедряться кабельные и радиорелейные системы. Первая в Казахстане радиорелейная связь между Алматы и Бишкеком (бывшим Фрунзе) стала функционировать с 1958 г. В радиорелейных системах использовались дециметровые и сантиметровые волны, поэтому они могли передаваться в пределах видимости антенны. Промежуточные небольшие радиостанции осуществляли передачу усиленных сигналов соседним станциям. Телесообщения сетями ретрансляторов на расстоянии 100—130 км друг от друга охватывали всю республику.

Телесообщения стали передаваться сначала из Алматы (1958 г.), позже из телецентров Усть-Каменогорска и Караганды. Особенно важную роль в улучшении качества передач и увеличении района охвата сыграла телебашня на горе Коктобе, построенная в 1984 г. Она расположена на возвышенности (250 м), а ее собственный “рост” — 372 м.

Успехи в области космической радиосвязи позволили создать новую систему связи, названную “Орбита”. Станция космической связи “Орбита” с 1967 г. работает и в Алматы. В этой системе используются ретрансляционные спутники связи. Сейчас всесторонне развивается система международной спутниковой связи, для которой используют

ся спутники на гелиостационарной орбите (36 000 км). В Казахстане также введена в строй волоконно-оптическая система связи магистраль “ТрансАзия — Европа”.

18 июня 2006 г. с космодрома Байконур запущен первый казахстанский спутник связи “Kazsat”.

В настоящее время осуществляется программа полетов спутников связи данной серии.

Государственная программа “Информационный Казахстан-2020”, принятая в 2013 г., направлена на развитие современных средств связи, и призвана обеспечить создание условий для перехода к информационному обществу. Предполагается довести: долю пользователей сети интернет в 2020 г. до 75%; охват эфирным цифровым телерадиовещанием населения Казахстана до 95%; долю государственных услуг, предоставляемых в электронном формате, до 50%. Развитие цивилизации XXI в. — очередного этапа научно-технической революции — характеризуется введением коммуникационных технологий во все сферы жизнедеятельности общества. Эти технологии являются фундаментом и материальной базой для перехода к информационному обществу с высокоразвитой социально-экономической сферой и культурой. В настоящее время самой интенсивно развивающейся сетью связи является мобильная радиосвязь (сотовая связь). Первым в мире пользователем сотового телефона был бывший руководитель отдела сети мобильной связи компании Motorola Мартин Купер. Кто мог подумать, что через 41 год после первого звонка мобильный телефон в корне изменит жизнь всего человеческого общества. Сейчас мобильный радиотелефон широко используется в пультах управления всевозможных устройств, эксплуатации кредитных карточек, фото- и видеокамерах и т. д. История развития сети сотовой связи в нашей стране начинается с 1994 г., когда начал действовать первый оператор сотовой связи “АЛТЕЛ”. Компания предоставила услуги мобильной связи в аналоговом стандарте AMPS (Advanced Mobile Phone Service) в диапазоне частот от 825 МГц до 890 МГц, для чего были использованы технологии и оборудование фирмы Motorola. Следующий этап развития средств связи в стране связан с работой компании “Кар-Тел”, который начал свою деятельность в 1998 г. В настоящее время в Казахстане сеть мобильной связи в основном осуществляется в формате GSM, UMTS и CDMA в стандарте GSM (900, 1800) МГц, UMTS / WCDMA (2100) МГц и CDMA (450, 800) МГц. Основными операторами являются:

- АО “Kcell” — торговые марки: Kcell, Activ и Vegaline;
- ТОО “Кар-Тел” — торговая марка Beeline;
- ТОО “Мобайл Телеком Сервис” — торговая марка Tele2;
- АО “АЛТЕЛ” — торговые марки Dalacom, Pathwovd и City.

Сейчас вводятся технологии 4G. Основным преимуществом 4G является высокая скорость передачи данных. В свое время переход к 3G означал (означает) возможность передачи данных на скоростях, позволяющих смотреть видео — это качественно новый шаг. Технологически он основывается на прорыве в создании малопотребляющих микроэлектронных средств обработки сигналов — как цифровых (DSP), так и аналоговых (например, высокочастотные малощумящие усилители, полупроводниковые приборы на основе GaAs и других широкозонных полупроводниковых материалов). Микроэлектронные технологии глубоко субмикронного уровня (65—45 нм и ниже) — это ни что иное, как снижение энергопотребления и увеличение функциональности в заданном объеме. Именно ради создания портативных устройств, в том числе телекоммуникационных, и ведут мировые лидеры полупроводниковых технологий пресловутую “гонку за нанометрами”.

4G устройства — это полноценный мультимедийный “офис в кармане”. Это — возможность устанавливать голосовые соединения, одновременно возможность для различных информационных сервисов — работа в интернете, обмен большими массивами данных, просмотр ТВ-трансляций (IPTV), видео по запросу и т. п. То есть все то, что пользователь имеет сегодня у себя дома (в офисе). Операторы сотовой связи ввели в эксплуатацию в 2011 г. в городах Нур-Султан, Алматы, также во всех областных центрах сети поколения 3G. С 2012 г. началось освоение проекта построения сети четвертого поколения в стандарте 4G.

Первые сети кабельного телевидения в нашей стране начали проводить в 1980 г. Сейчас в республике услуги кабельного телевидения предлагают 146 операторов.

В марте 2003 г. в Казахстане была создана Ассоциация кабельных операторов ТВ. Назовем крупных операторов: АО “Алма-ТВ”, Холдинг “Alem Communications”; “Icon TV”; “Казахтелеком”; “iDTV”.

В развитии спутниковой связи большую роль играет Центр управления полетами космических ракет космодрома Байконур, где через спутниковую сеть “Жарык” телевидение распространяется во все регионы Казахстана, в приграничные районы России, Узбекистана, Монголии и Китая. Спутник “Казсат-3” обеспечивает независимость нашей телекоммуникационной связи от зарубежных операторов связи. В 2014 г. был запущен первый казахстанский спутник дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) “KazEOSat-1”.



1. Какие виды связи используются в вашем городе, районе?
2. Подготовьте проект на тему: “Стандарты — 3G, 4G”?
3. Подготовьте презентации о стандартах 5G и искусственном интеллекте.

§ 30. Биологические действия высокочастотных электромагнитных волн и защита от них



Ключевые понятия:

- ✓ **естественные и искусственные источники электромагнитного излучения**

На этом уроке вы:

- узнаете о влиянии источников электромагнитного поля на живые организмы.



Человечество живет во Вселенной в океане гравитационного поля, радиоактивных лучей и электромагнитных излучений. Развитие мировой цивилизации добавило к источникам естественных полей внешней среды искусственные источники излучений. Существуют естественные и искусственные источники электромагнитного излучения. К естественным электромагнитным полям относятся радиоизлучения атмосферы, Солнца и звезд, электрические и магнитные поля Земли. К искусственным источникам электромагнитного поля относятся теле- и радиостанции, трансформаторы, радиолокаторы, системы электрических цепей, микроволновые печи, электросварка, измерительные приборы, телевидение, мобильные телефоны и т. д. Активность влияния этих полей на живые организмы в зависимости от интенсивности и частоты колебаний различна.

Среда искусственного электромагнитного излучения состоит из постоянного электрического и магнитного полей, низкочастотных электромагнитных полей и радиоволн в диапазоне 30 кГц и 300 ГГц. Статическое поле действует на живые организмы на близких расстояниях, так как плотность потока этой энергии убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Санитарная предельная доза напряженности электрического поля равна $1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. В высоковольтных линиях электропередачи превышение этой дозы наблюдается на расстояниях до десятка, иногда до сотни метров. Специальные исследования показали, что нахождение под линией электропередачи по 15 мин. три раза в день в течение шести дней вызовет изменения неврологического характера, понижение работоспособности мозга. К мощным источникам электромагнитных полей можно отнести применяемые в промышленности электрические токи. В районах, где имеются высоковольтные электрические линии, напряженность электрического поля может достигать до нескольких тысяч вольт на 1 м. Например, на станции электропередачи напряжением 330 кВ напряженность равна $5000 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, а когда напряжение равно

550 кВ, напряженность доходит до $8000 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Однако благодаря почве, которая хорошо поглощает электромагнитные волны, напряженность в 100 м от электролинии уменьшается в сотни раз. Здания, деревья, рельеф Земли также являются преградами для поля.

Влияние на человеческий организм высокочастотных электромагнитных волн радио и телевидения зависит от частоты. Чем выше частота или чем меньше длина волны, тем больше вредное воздействие высокочастотных электромагнитных волн. Электромагнитные волны распространяются на большие расстояния, поэтому сохраняется опасность их вредного влияния на человеческий организм.

Переменные электромагнитные волны проникают в человеческий организм и переориентируют молекулы воды в нем по направлению распространения волны. Переменная поляризация диэлектриков типа сухожилий и появление токов проводимости вызывают повышение температуры клеток. Электромагнитные волны сильнее всего действуют на органы человека, такие как глаза, мозг, почки, желудок и т. д. Ослабляется острота зрения, что может наблюдаться через несколько недель. Когда мощность постоянных магнитных и электрических полей превышает предельные нормы, могут появиться отклонения в работе органов дыхания, пищеварения, сердца и кровообращения. Высокочастотные ультразвуки, лазерные лучи и электромагнитные волны очень сильно влияют на мозг человека. Если же они применяются в не мирных целях, влияние этого психотропного оружия может изменить работу мозга: ухудшается память, нарушается координация движений, появляется неадекватная реакция на происходящее, человек становится неуравновешенным.

Сейчас во многих странах мира люди выступают против применения подобного оружия. Учитывая вредные влияния высокочастотных электромагнитных волн, осуществляются меры защиты от них. Короткометражные радиостанции должны строиться далеко от населенных пунктов. Вокруг телецентров, радиолокаторных станций организуются специальные санитарные защитные зоны. Узлы электропередачи напряжением выше 750 кВт должны находиться от жилых зданий на расстоянии не менее 300 м. В местах, где находятся высокочастотные установки, обязательно должны быть приняты защитные меры. Хотя в компьютерах и кинескопах телевизоров имеются специальные защитные слои, с точки зрения испускания электромагнитных излучений они все еще являются источниками опасности. Телевизор надо смотреть на расстоянии не ближе чем 2,5—3,4 м. Цветные телевизоры нельзя смотреть более 1,5 ч в день и обязательно с 30—40-минутными перерывами. О своем здоровье каждый человек должен заботиться сам.



1. Имеются ли высоковольтные линии рядом с вашим домом, школой?
2. Сколько времени в день можно проводить перед компьютером?
3. Знаете ли вы, что мобильный телефон — это маленькая станция? Сделайте сообщение о его пользе и вреде.

Самое важное в главе 5

- Максвелл создал теорию электромагнитного поля. По теории Максвелла любые изменения магнитного поля в окружающем пространстве способствуют появлению вихревого электрического поля. Переменное электрическое поле всегда создает вихревое магнитное поле. Электромагнитное поле может распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн.

- В электромагнитной волне напряженность электрического поля и вектор индукции магнитного поля \vec{B} периодически изменяются. Векторы взаимно перпендикулярны направлению распространения волны. Электромагнитные волны поперечны.

- Электромагнитные волны излучаются в процессе колебаний ускоренно движущихся заряженных частиц (электронов).

- Энергетическая характеристика электромагнитных излучений — *плотность потока волн*:

$$I = \frac{W}{S \cdot \Delta t}.$$

- *Интенсивность электромагнитной волны* обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника и прямо пропорциональна четвертой степени частоты:

$$I \sim \frac{\omega^4}{r^2}.$$

- Немецкий ученый Г. Герц был первым, получивший электромагнитные волны. А. С. Попов открыл систему связи радиотелеграфа, а Г. Маркони изобрел радио.

- С помощью электромагнитных волн осуществляются радиосвязь, радиолокация, радиовещание и телевидение, космическая связь, радиотелескопические исследования и др.

Раздел III. ОПТИКА

Глава 6. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

§31. Электромагнитная природа света. Скорость света



Ключевые понятия:

- ✓ свет
- ✓ квантовая теория света

На этом уроке вы:

- объясните лабораторный и астрономический методы определения скорости света.



В этой главе мы с вами приступаем к изучению световых явлений, с которыми человек встречается ежедневно и ежечасно. Мы научились использовать световую энергию на практике. Нам известны как законы распространения света в среде, так и действия, которые оказывает свет, взаимодействуя с веществом. Так, например, свет нагревает тела, оказывает химическое действие, а также давление, т. е. проявляется механическое действие света. Около 80% информации об окружающем нас мире мы получаем через зрение. Действие света на глаз сводится к химическому процессу, возникающему в чувствительной оболочке глаза и вызывающему раздражение зрительного нерва и соответствующих центров головного мозга.

Раздел физики, изучающий закономерности распространения света, процессы взаимодействия света с веществом, природу света, называется оптикой.

Краткие сведения из истории развития взглядов на природу света. Человечество давно интересовал вопрос о природе света. Уже древние люди задумывались о том, почему человек видит. В III в. до н. э. древнегреческие философы выдвигали много разных гипотез о природе света. Так, например, Пифагор считал, что глаз испускает “флюиды”, идущие к предметам, и посредством их человек видит. Евклид создал теорию зрительных лучей, исходящих из глаз человека. Они как бы ощупывают предмет и несут информацию о нем. Демокрит считал, что зрение обусловлено попаданием на глаз мелких атомов, исходящих из предмета, т. е. с каждого предмета непрерывно срываются оболочки, подобные самим предметам. Эти оболочки — “призраки”, или “образы” предметов, попадая на глаз человека, вызывают ощущение формы, цвета и размеров предметов. Аристотель же говорил, что свет — это некоторое действие, распространяющееся в пространстве от источника света. Платон пытался соединить эти две теории в одну. Он считал, что зрительные образы возникают в результате

взаимодействия излучений, идущих от предметов, с “мягким светом дня”, исходящим из глаз.

В 1672 г. великий английский физик Исаак Ньютон создал корпускулярную теорию света. Согласно этой теории, свет — это поток раскаленных мелких быстро летящих частиц (корпускул), испускаемых светящимися веществами. Эта теория просуществовала около 200 лет. Она хорошо объясняла законы отражения и преломления света, его прямолинейное распространение, дисперсию, но не объясняла интерференцию и дифракцию света.

Немного позже, в 1690 г., нидерландский физик Х. Гюйгенс, который был противником корпускулярной теории, создал волновую теорию света, согласно которой, свет представляет собой распространение колебаний особой среды — эфира. Свет распространяется так же, как и звук, сферическими волнами, но в отличие от звуковых волн световые распространяются с очень большой скоростью — 300 000 км/с. Волновая теория поддерживалась на протяжении XVIII в. такими известными учеными, как Л.Эйлер, М.В.Ломоносов, Б.Франклин. Она хорошо объясняла явления интерференции и дифракции света, независимое распространение световых лучей, но не объясняла его прямолинейное распространение. В начале XIX в. трудами О.Френеля и Т.Юнга была надежно обоснована волновая теория света.

Корпускулярная и волновая теории просуществовали вместе на протяжении 200 лет. Их постоянное соперничество позволило продвинуться далеко вперед в процессе объяснения многих световых явлений.

В 1865 г. английский физик Дж. Максвелл теоретически доказал, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости распространения света, т. е. именно с такой скоростью должно распространяться любое электромагнитное возмущение. Отсюда следует, что свет является частным случаем электромагнитных волн. Далее Максвеллом была создана электромагнитная теория света, которая достаточно убедительно объясняла все волновые свойства света.

В конце XIX в. немецким физиком Г. Герцем было открыто явление внешнего фотоэффекта (вырывание электронов из вещества падающим на него светом), которое волновая теория не объясняла. В 1900 г. немецкий физик М. Планк выдвинул гипотезу о том, что свет излучается и поглощается отдельными порциями — *квантами*. А. Эйнштейн развил эту гипотезу, предположив, что свет представляет собой локализованные порции энергии — фотоны. При распространении эти порции ведут себя как электромагнитные волны, а при взаимодействии с веществом — как частицы. Так возникла *квантовая теория света*, согласно которой *свет представляет собой электромагнитные волны, излучающиеся и*

поглощающиеся отдельными порциями — **квантами**. Следовательно, свет обладает корпускулярно-волновым дуализмом, т. е. он может проявлять как волновые свойства, так и свойства частицы. Причем чем меньше длина волны света, тем отчетливее проявляются корпускулярные свойства света, а чем больше длина волны, тем очевиднее его волновые свойства.



1. Что такое оптика?
2. Что собой представляет свет?
3. Кто исследовал теорию света?

§ 32. Интерференция света



Ключевые понятия:

- ✓ интерференция света
- ✓ бипризмы и бизеркала
- ✓ показатель преломления
- ✓ голограмма

На этом уроке вы:

- проведете сравнительный анализ интерференционных картин световых и механических волн.

При взаимодействии световых волн особенно интересен случай сложения волн одинаковой частоты с постоянным сдвигом фаз, так как при этом мы будем наблюдать интерференцию, заключающуюся в том, что в одних точках пространства волны будут усиливать друг друга, а в других — ослаблять. При этом будут наблюдаться чередующиеся светлые и темные полосы. Это и есть *интерференция света*. Она происходит точно так же, как и интерференция механических волн, и условия минимума (ослабления света) и максимума (усиления света) будут находиться в соответствии с формулами (16.6) и (16.7). В то же время есть и некоторые особенности интерференции световых волн.



Томас Юнг
(1773—1829)

Нам известно, что если два источника излучают синусоидальные волны одинаковой частоты, то в месте их встречи возникает интерференционная картина, но если попытаться получить эту картину с помощью двух независимых источников света, излучающих одинаковый свет, то никакой интерференционной картины мы не получим. Вроде бы следует вывод о том, что интерференции световых волн не существует.

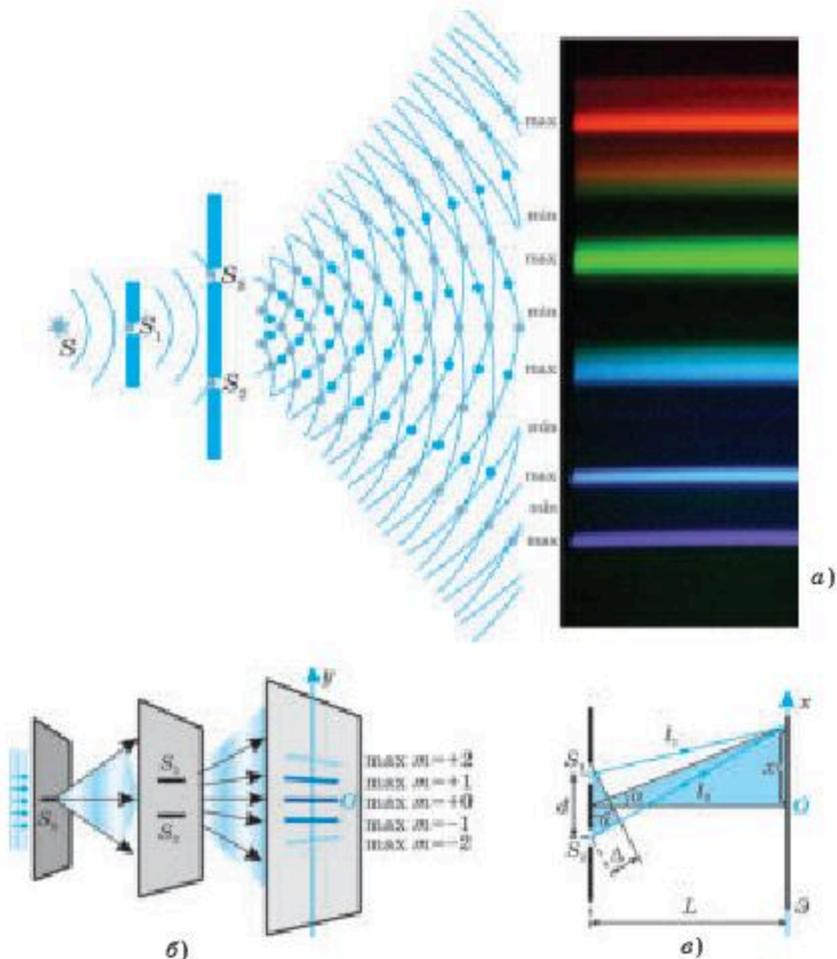


Рис. 32.1

Но явление интерференции света наблюдал еще в 1675 г. Ньютон, а позднее и Юнг, и Френель. Как же это объяснить? Оказывается, все дело в волновых цугах. Разные атомы тела излучают независимо друг от друга, и поэтому, несмотря даже на то, что у них может быть одинаковая частота, фазы у разных цугов различны. А это означает, что свет, излучаемый разными атомами возбужденного тела, приходит в данную точку пространства так, что сдвиг фаз между этими колебаниями постоянно меняется. Тогда амплитуда результирующего колебания, возникающего при сложении двух волн в данной точке, тоже будет изменяться за одну секунду случайным образом около миллиона раз (то минимум, то максимум). Наши глаза будут воспринимать картину равномерного освещения всей поверхности, на которую падает световая энергия. Поэтому *интерференция световых волн возникает только при сложении когерентных волн.*

Двухлучевая интерференция и методы ее осуществления. Рассмотрим методы получения когерентных волн. Их получают искусственно с помощью интерферометров. Самый простой способ — разбить один световой луч на два.

1. Метод Юнга. Английский физик Томас Юнг получил пространственную когерентность световых волн. Для этого он использовал один источник света S , перед которым была помещена преграда с небольшим отверстием S_1 . Световые волны, проходя через это отверстие, одновременно и в одинаковых фазах достигают двух малых отверстий S_2 и S_3 , расположенных близко друг к другу и симметрично источнику света S (рис. 32.1). Поэтому можно считать, что два отверстия S_2 и S_3 находятся на одной волновой поверхности. По принципу Гюйгенса каждая точка волновой поверхности (в нашем случае это первое и второе отверстия) является источником вторичных волн. Эти волны, накладываясь друг на друга, образуют интерференционную картину.

Чтобы определить разность хода в случае, изображенном на рисунке 32.1, можно произвести расчеты, которые приведут к следующей формуле: $\Delta = \frac{d}{l} x$, где Δ — разность хода волн; d — расстояние между отверстиями S_2 и S_3 ; l — расстояние от отверстий S_2 и S_3 до экрана; x — расстояние от центрального максимума до точки M на экране, в которой мы наблюдаем интерференционную картину (рис. 32.1, а).

2. Методы Френеля. Французский физик Огюстен Жан Френель предложил другой способ получения когерентных световых волн. Для этого он использовал *бипризмы* и *бизеркала*. Бипризма состоит из двух



Огюстен Френель
(1788—1827)

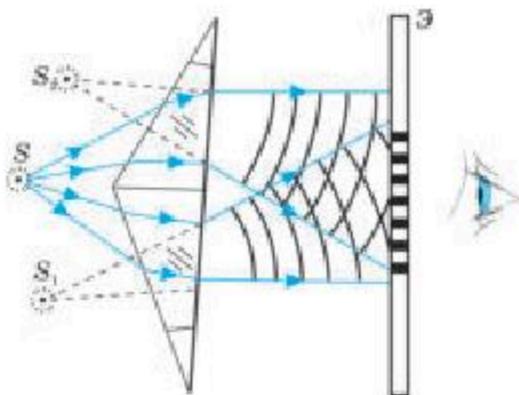


Рис. 32.2

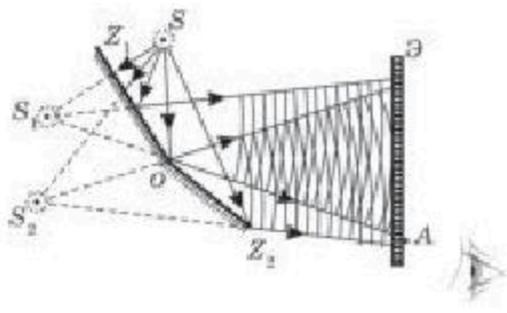


Рис. 32.3

одинаковых призм с очень малым преломляющим углом. Эти призмы сложены друг с другом основаниями. Бипризма Френеля имела при основании очень большой тупой угол, приблизительно равный $175^\circ - 179^\circ$. Лучи от источника света S падают на бипризму, и получаются как бы два источника световых волн S_1 и S_2 , расположенных на дуге окружности (рис. 32.2). На экране \mathcal{E} наблюдается устойчивая интерференционная картина, т. е. чередующиеся светлые и темные полосы.

Принцип действия бизеркала тот же. Вообразим, что зеркала Z_1 и Z_2 являются радиусами окружности с центром, расположенным в точке O (рис. 32.3). На окружности находится источник света S . Зеркала Z_1 и Z_2 расщепляют луч света на два, которые собираются в точке A на экране \mathcal{E} .

3. Метод тонких пленок. Мы часто наблюдаем разноцветные переливающиеся блики на каплях бензина, масла или нефти, растекшихся на поверхности воды, мыльных пузырях, крыльях стрекоз. И при этом даже не предполагаем, что имеем дело с интерференцией световых волн. Рассмотрим, что происходит при падении света на поверхность тонкой пленки бензина (рис. 32.4). Тонкая пленка бензина образует плоскопараллельную пластинку. Луч, идущий от источника света S , на пленке разбивается на несколько когерентных лучей, и мы можем наблюдать интерференцию света как в проходящем, так и в отраженном свете. Поскольку толщина пленки непрерывно меняется, то изменяется и вид интерференционных картин в тонких пленках, отсюда и причудливый вид цветных интерференционных картин. Произведя некоторые расчеты, можно получить формулу для определения разности хода волн в тонких пленках: а) *в проходящем свете* $\Delta = 2dncos\beta$, где Δ — разность хода волн; d — толщина пленки, n — показатель преломления вещества пленки; α — угол падения луча; β — угол преломления света; б) *в отраженном свете* $\Delta = 2dncos\beta + \frac{\lambda}{2}$. В отраженном свете к разности хода добавляется полволны, так как при отражении теряется полволны.

4. Кольца Ньютона. Кольца Ньютона являются частным случаем интерференции на тонких пленках, когда толщина пленки равномерно изменяется. Впервые цвета тонкой прослойки воздуха, заключенной между плоским стеклом и выпуклой поверхностью объектива астрономического рефрактора, наблюдал английский физик Исаак Ньютон в 1675 г. Толщина прослойки воздуха между плотно сжатыми стеклами в опыте Ньютона медленно и правильно нарастала от места соприкосновения стекол к наружным частям объектива (рис. 32.5). Путем довольно простых расчетов можно определить, например, радиус светлого кольца в проходящем свете: $r = \sqrt{2Rd}$, где r — радиус k -того кольца;

R — радиус кривизны линзы; λ — длина волны,

а в отраженном свете: $r = \sqrt{(2k - 1) \frac{\lambda}{2} R}$.

Практическое применение интерференции света. Интерференция света — это физическое явление, которое представляет собой интерес как с научной точки зрения, так и с практической. Рассмотрим некоторые примеры практического применения интерференции света.

1. *Интерферометры* — это чувствительные приборы, позволяющие точно определять очень малые углы, длины световых волн, размеры малых отрезков, показатели преломления различных веществ, качество обработки поверхности, точность полировки поверхности. Интерферометры особенно эффективны при изучении качества обработки поверхностей линз, зеркал и других приборов оптики. С их помощью исследуют быстропротекающие процессы в воздухе, происходящие вокруг летательных аппаратов. Действие интерферометров основано на явлении интерференции света. Во всех интерферометрах световые лучи сначала расщепляются на два или более когерентных луча, а затем эти лучи сходятся вместе. Конструкции интерферометров различны, но принцип действия одинаков. В современной науке используются двухлучевые интерферометры Майкельсона и многолучевые интерферометры Линника, Луммера — Герхе, Фабри — Перо.

2. *Явление интерференции* используется для просветления оптики, другими словами, с помощью интерференции можно увеличить или уменьшить количество отраженного света. В оптических приборах много оптических деталей, при отражении от которых большая часть света теряется, поэтому изображение предмета темнеет. Но если на поверхность линз наносить тонкий слой особой пленки, то можно добиться, чтобы в этой пленке световые лучи гасили друг друга в отраженном свете, тогда вся световая энергия проходит сквозь линзу и изображение получается более ярким.

Расчеты доказали, что *показатель преломления материала пленки должен быть меньше показателя преломления вещества линзы, но больше показателя преломления среды, окружа-*

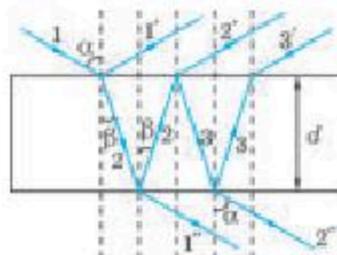


Рис. 32.4

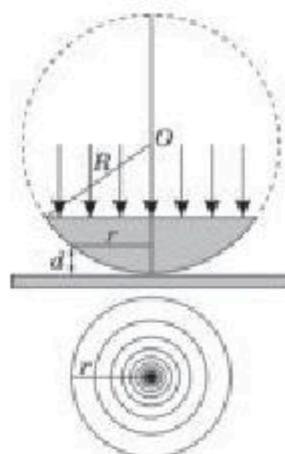


Рис. 32.5

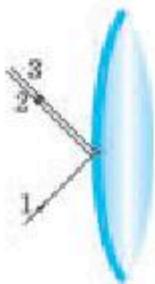


Рис. 32.6

ющей линзу, т. е. воздуха. Технология покрытия линз пленкой разработана советским физиком И. В. Гребенчиковым. Свет отражается два раза: сначала на границе воздух — пленка, а затем на границе пленка — линза (рис. 32.6). Толщина и показатель преломления подбираются так, чтобы оба отраженных луча были в противофазах, тогда они будут гасить друг друга. Зато в проходящем свете мы будем иметь усиление света. Условие максима

ма в проходящем свете выглядит так: $\Delta = 2dn\cos\beta + \frac{\lambda_0}{2}$.

Пусть свет падает нормально к поверхности линзы, тогда угол $\beta = 0^\circ$, и поэтому $\cos\beta = 1$. Тогда получим, что $d = \frac{\lambda_0}{4n}$, где d — толщина пленки; λ_0 — длина волны света в среде (в воздухе); n — показатель преломления пленки. Расчеты показали, что полное гашение света наблюдается при выполнении следующего условия: $n_{\text{пленки}} = \sqrt{n_{\text{линзы}}}$. Так как толщина пленки зависит от длины волны падающего света, то расчеты производятся для длин волн наиболее интенсивных лучей, т. е. лучей голубого и фиолетового цветов. Поэтому линзы с просветленной оптикой имеют фиолетовый оттенок.

3. С помощью интерферометров можно измерить коэффициенты линейного расширения твердых тел, а также изменение размеров ферромагнетиков в магнитном поле.

Даже из этих перечисленных выше примеров использования интерференции (хотя названы только основные) можно сделать вывод о том, какое важное значение имеет изученное нами явление интерференции света.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Очень часто у вас перед глазами появляются маленькие расплывчатые пятнышки, которые иногда усиливаются, а иногда уменьшаются. Эти пятнышки представляют собой *интерференционную картину, вызванную дифракцией света на круглых клетках крови, плавающих прямо перед желтым пятном сетчатки (область с повышенным содержанием колбочек). А клетки крови могут попасть в глаз из капилляров, разрушающихся вследствие старения или из-за повышения кровяного давления или ударов. Под действием осмотического давления эти клетки раздуваются в шарики.*



1. В чем состоит отличие интерференции света от интерференции механических волн?
2. Что такое когерентные и некогерентные электромагнитные волны? Приведите примеры.
3. Перечислите известные вам способы получения двухлучевой интерференции.
4. В максимумах интерференционной картины от двух источников света освещенность может быть в четыре раза больше освещенности, создаваемой от одного источника света. Не нарушается ли здесь закон сохранения энергии?
5. Чем объясняется расцветка крыльев стрекоз? Почему она изменяется, если рассмотреть их под разными углами?
6. Почему не могут интерферировать лучи света, идущие от двух различных источников или даже от двух различных точек одного и того же источника?
7. С помощью бизеркал Френеля получили интерференционные полосы, пользуясь красным светом. Как изменится картина интерференционных полос, если воспользоваться фиолетовым светом?
8. Можно ли потушить свет светом? Если да, то как это сделать?
9. Какова приблизительно толщина мыльного пузыря в тех местах, где он кажется зеленым?
10. Перечислите известные вам примеры использования интерференции.



Подготовьте доклад или сообщение на темы "Интерферометр Майкельсона", "Интерферометры Линника, Луммера—Герхе, Фарби—Перо и их применение", "Просветление оптики".

Пример решения задач

1. Два когерентных источника S_1 и S_2 испускают свет с длиной волны 500 нм. На каком расстоянии от точки O на экране располагается первый максимум освещенности, если расстояние между источниками света 0,5 мм, а расстояние от каждого источника до экрана 2 м?

Дано:	СИ
$k = 1$	
$d = 0,5 \text{ мм}$	$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
$\lambda = 500 \text{ нм}$	$500 \cdot 10^{-9} \text{ м}$
$L = 2 \text{ м}$	
$x = ?$	

Решение. Условие максимума при интерференции выглядит так:

$$\Delta = k\lambda, \quad (1)$$

где Δ — разность хода лучей от двух источников света; k — порядок максимума; λ — длина волны света. Так как спектр первого порядка, то $k = 1$. Из рисунка 32.7 найдем пути, проходимые лучами от каждого источника, как гипотенузы в прямоугольных треугольниках S_1MC и S_2MC .

Согласно теореме Пифагора, и зная, что $d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$, получим:

$$r_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \text{ и } r_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2.$$

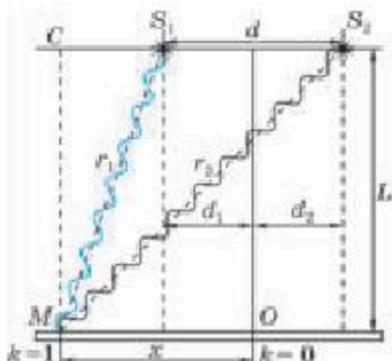


Рис. 32.7

Отсюда имеем $r_2^2 - r_1^2 = 2xd$ или $(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2xd$. Интерференционная картина будет четкой, если расстояние $S_1S_2 = d$ между источниками невелико по сравнению с расстоянием их до экрана $MC = L$, т. е. когда $d \ll L$. В этом случае $r_2 + r_1 \approx 2L$ и $r_2 - r_1 = \frac{2xd}{2L}$. Так как $\Delta = r_2 - r_1$, то $\Delta = \frac{xd}{L}$. Из выражений для Δ получим: $k\lambda = \frac{xd}{L}$.

Отсюда следует, что $x = \frac{k\lambda L}{d}$. Произведя вычисления, получим:

$$x = \frac{1 \cdot 500 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 2 \text{ м}}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2 \text{ мм}.$$

(2 мм)



1. Капните на поверхность воды бензином. Чем объяснить образование цветных пятен на тех местах, где на ней бензин?
2. Выдуйте мыльный пузырь. Обратите внимание на изменение цвета оболочки мыльного пузыря сверху вниз. Объясните, почему разные слои оболочки пузыря имеют разный цвет.



1. Почему окраска крыльев некоторых птиц и насекомых меняется, если рассматривать их под разными углами?
2. На стеклах, длительное время подвергавшихся атмосферным влияниям или пролежавшим длительное время в сырой земле, наблюдаются красивые радужные оттенки. Как объяснить их происхождение?



Упражнение 15

1. В некоторую точку пространства приходят когерентные лучи с геометрической разностью хода 1,2 мкм, длина волны которых в вакууме 600 нм. Определите, что произойдет в этой точке вследствие интерференции: в воздухе; в воде; в стекле с показателем преломления 1,5.

Ответ: усиление, ослабление, усиление.

2. Экран освещается светом с длиной волны 590 нм, идущим от двух когерентных источников S_1 и S_2 , расстояние между которыми 200 мкм (рис. 32.8). Определите расстояние от источников света до экрана, если в точке B экрана, отстоящей от центра экрана O на 15 мм, наблюдается центр второй интерференционной полосы.

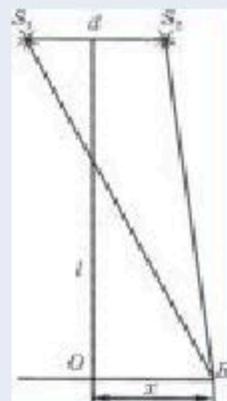


Рис. 32.8

Ответ: 2,03 м.

3. Когерентные источники белого света, расстояние между которыми 0,32 мм, имеют вид узких щелей. Экран, на котором наблюдают интерференцию света от этих источников, находится на расстоянии 3,2 м от них. Найдите расстояние между красной ($\lambda_{\text{к}} = 760$ нм) и фиолетовой ($\lambda_{\text{ф}} = 400$ нм) линиями второго интерференционного спектра на экране.

Ответ: 7,2 мм.

4. Два когерентных источника света, расстояние между которыми 240 мкм, удалены от экрана на 2,5 м, причем на экране наблюдаются чередующиеся темные и светлые полосы. Установлено, что на отрезке длиной 5 см умещается 10,5 полосы. Чему равна длина волны, падающего на экран света?

Ответ: 4,57 нм.

5. Тонкая пленка толщиной 0,5 мкм освещается светом с длиной волны 590 нм. Какой будет казаться эта пленка в проходящем свете, если показатель преломления вещества пленки 1,48, а лучи направлены перпендикулярно поверхности пленки? Что будет происходить с окраской пленки, если ее наклонять относительно лучей?

Ответ: черной; то желтой, то черной.

6. Какую минимальную толщину должна иметь пластинка, сделанная из материала с показателем преломления 1,54, чтобы при ее освещении лучами с длиной волны 750 нм, перпендикулярными поверхности пластинки, она в отраженном свете казалась: а) красной; б) черной?

Ответ: а) 120 нм; б) 240 нм.

7. Тонкая пленка при освещении белым светом кажется зеленой в отраженном свете, если на нее смотреть по направлению перпендикуляра к ее поверхности. Что будет происходить с окраской пленки, если ее наклонять относительно световых лучей?

Ответ: изменяется от красной к голубой, синей, фиолетовой.

8. Чем объяснить, что при освещении тонкой пленки параллельными монохроматическими лучами в одних местах пленки видны светлые пятна, а в других — темные?
9. Чем объяснить, что при освещении тонкой пленки параллельными пучками белого света наблюдается радужная окраска пленки?
10. Почему поверхность воды, на которой разлили бензин, становится радужного цвета?

§ 33. Дифракция света



Ключевые понятия:

- ✓ дифракция
- ✓ разрешающая способность оптических приборов

На этом уроке вы:



- объясните дифракционную картину от нити, щели, круглого отверстия, используя теорию Френеля.

Дифракцией света называется отклонение света от прямолинейного распространения или огибание светом препятствий. Дифракция света была открыта итальянским физиком Франческо Мария Гримальди в середине XVII в. Он проделал очень простой опыт: между ставнями окна оставил узкую щель, через которую луч света попадал на палки разной толщины. Изучая тени от них, он обнаружил нарушение законов геометрической оптики. Там, где должна была быть тень, наблюдались светлые полосы, которые к тому же были еще и окрашенными. Наблюдать дифракцию света от одной щели трудно, так как для этого размеры отверстия или препятствия должны быть соизмеримы с длиной световой волны, а на практике размеры препятствий всегда больше длины световой волны. Поэтому наблюдать дифракцию можно только на довольно больших расстояниях от преграды. Так, например, во время лунного затмения можно наблюдать огибание Земли светом, идущим от Солнца. Луна становится темно-красной, так как световые волны именно этой длины волны, обогнув Землю, проинтерферировали на поверхности Луны. То есть для наблюдения дифракции необходимо создать должные условия.

Приведем некоторые опыты, подтверждающие явление дифракции света. Если поместить перед источником света узкую щель, то на экране, расположенном в темном помещении, ожидается появление изображения щели. Оно и появлялось, но было окрашенным, и не всегда напротив щели было светлое пятно, иногда оно было темным. Или, если взять отверстие, в котором натянута тонкая проволока или человеческий волос, то на экране должна появиться тень от проволоки. На самом же деле на экране были видны несколько теней от проволоки.

Проявление дифракции света состоит в том, что распределение освещенности поверхности отличается от простой картины, предсказываемой геометрической оптикой на основе прямолинейного распространения света.

Явление дифракции света и механических волн было объяснено Гюйгенсом и Френелем. Согласно принципу Гюйгенса — Френеля, каждую точку волнового фронта можно принять за центр новых (вторичных) сферических волн. Пусть поверхность AB (рис. 33.1) представляет собой положение волнового фронта в некоторый момент времени. Тогда

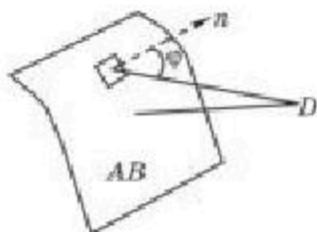


Рис. 33.1

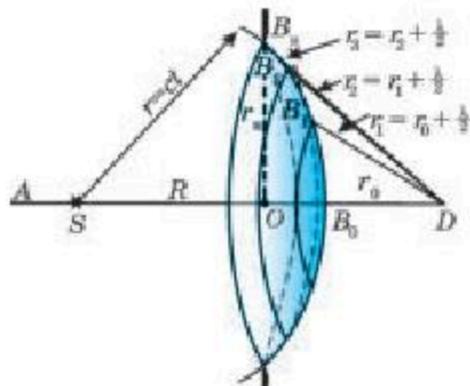


Рис. 33.2

для того чтобы определить вызванные волной колебания в некоторой точке D , по Френелю, нужно определить колебания, вызываемые в этой точке отдельными вторичными волнами, приходящими в данную точку от отдельных элементов поверхности AB , а затем сложить эти колебания с учетом их амплитуд и фаз, т. е. результирующая дифракционная картина для любой точки D будет определяться как результат интерференции волн.

Дифракция в сходящихся лучах. Пусть у нас имеется источник света S , расположенный на расстоянии R от круглой щели радиусом r_0 , и пусть свет падает на край щели в точке B_0 (рис. 33.2). В ней он изменит свое направление. На прямой B_0A выберем некоторую точку D , в которой собираются световые лучи, идущие от края щели. Пусть источник света S — точечный и монохроматический, а среда, в которой распространяется световая волна, изотропна. Тогда волновой фронт в произвольный момент времени будет иметь форму сферы радиуса $r = ct$. Каждая точка на этой волновой поверхности становится источником вторичных сферических волн. Колебания во всех точках волновой поверхности происходят с одинаковой частотой и в одинаковой фазе, следовательно, *вторичные волны когерентны*. В результате наложения этих волн в точке D происходит либо увеличение, либо уменьшение амплитуды результирующего колебания (ведь расстояния от точки D до различных точек волновой поверхности не одинаковы, и поэтому колебания от них будут приходить в эту точку в разных фазах), и мы наблюдаем или светлое, или темное пятно.

Наблюдаемое явление называется *дифракцией от круглого отверстия в сходящихся лучах*.

Дифракция в параллельных лучах. Впервые эту дифракцию получил и изучил немецкий физик Йозеф Фраунгофер. Дифракция Фраунгофера — это дифракция света, полученная с помощью дополнительной оптики. Для того чтобы получить параллельные лучи, источник света должен находиться в бесконечности. В лабораторных же условиях для

получения параллельных лучей используют *коллиматорную трубку* (от лат. *collimo* — “направлять по прямой”). Источник света помещают в фокус линзы и световые лучи после преломления в ней идут параллельно. На пути этих параллельных лучей помещают еще одну линзу, которая собирает их в одну точку на экране, расположенном в фокальной плоскости второй линзы.

Разрешающая способность оптических приборов. Явление дифракции света ставит предел для разрешающей способности многих оптических приборов и человеческого глаза. Так нам известно, что диаметр зрачка человеческого глаза (а это диаметр отверстия, через которое проходят световые волны) при дневном освещении примерно равен $D = 2$ мм. Человеческий глаз наиболее восприимчив к длинам волн $\lambda = 560$ нм. Тогда угловой радиус центрального светлого дифракционного пятна будет равен:

$$\alpha = \frac{\lambda}{D} = \frac{560 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-3}} \approx 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ рад} \approx 1', \quad (33.1)$$

Следовательно, две светящиеся точки могут восприниматься глазом как отдельные источники света при условии, если угловое расстояние между ними превышает угловой радиус центрального дифракционного светлого пятна от одного точечного источника. Поэтому разрешающая способность человеческого глаза примерно равна $1'$. При фотографировании звезд с помощью телескопа их изображение на фотоснимке из-за дифракции света получается не точечным. Расчеты показывают, что разрешающая способность телескопа диаметром объектива b м примерно равна $0,02''$. Явление дифракции ограничивает и разрешающую способность микроскопа. Очевидно, что если в изображении, построенном объективом микроскопа, две светящиеся точки становятся неразличимыми в результате наложения их дифракционных изображений, то дальнейшее увеличение изображения с помощью окуляра уже не сможет сделать их различимыми. Разрешающая способность микроскопа возрастает с ростом диаметра объектива микроскопа, с уменьшением длины волны света и расстояния от объектива до объекта. Поэтому один из способов увеличения разрешающей способности микроскопа состоит в использовании коротковолнового ультрафиолетового излучения, которое, воздействуя на фотопленку, засвечивает ее. Полученное изображение проявляется и потом рассматривается.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Иногда в воздухе возникают перламутровые облака, и имеющие очень красивые тона. После захода солнца они настолько яркие, что свет от них окрашивает снег. Причина возникновения этих облаков — дифракция света. Перламутровые облака наблюдаются преимущественно в полярных широтах на высотах от 15 до 27 км и являются достаточно редким явлением. Перламутровые облака состоят из капель, радиусы которых (0,1—3 мкм) близки к длине волны видимого света. На этих каплях происходит дифракция света, которая зависит от радиуса капли и длины волны.



1. Прищурьте глаз и посмотрите на нить лампочки накаливания. Что будете наблюдать? Почему?
2. Если перед запыленным зеркалом зажечь свечу, можно увидеть вокруг пламени радужный ореол. Проведите эксперимент и объясните наблюдаемое явление.



1. В чем заключаются особенности протекания дифракции в оптике?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса — Френеля. Расскажите, как рассчитать амплитуду колебаний в некоторой точке пространства, вызываемых проходящей через малое отверстие световой волной.
3. Что такое зоны Френеля? Как осуществляется их построение?
4. Докажите, что площади зон Френеля одинаковы. Что нам дает это равенство?
5. Как объяснить периодическое изменение освещенности в центре дифракционной картины от круглого отверстия при увеличении диаметра отверстия или изменения расстояния от отверстия до экрана, на котором наблюдается дифракционная картина?
6. В чем состоит отличие дифракции Фраунгофера от дифракции Френеля?
7. Почему невозможно рассматривать в микроскоп очень мелкие объекты?
8. От каких факторов зависит разрешающая способность глаза?
9. Можно ли увидеть космонавта на Луне в оптический телескоп с диаметром зеркала 6 м?
10. Предложите оптический метод измерения толщины человеческого волоса.

§ 34. Дифракционные решетки



Ключевые понятия:

- ✓ период решетки
- ✓ дифракционная картина

На этом уроке вы:

- познакомитесь с понятием "дифракционная решетка".



Для того чтобы получать и наблюдать четкую, яркую дифракционную картину, используют дифракционную решетку. **Дифракционная решетка** — это совокупность большого числа препятствий и отверстий, на которых происходит дифракция света.

Различают регулярные и нерегулярные дифракционные решетки. **Регулярными решетками** называются те, в которых отверстия располагаются в строгом порядке, а **нерегулярные** — это те, в которых отверстия расположены беспорядочно. Кроме того, по геометрической структуре различают **плоские** и **пространственные решетки**. Примером пространственной нерегулярной решетки является скопление капелек тумана в воздухе или скопление кристалликов льда.

Плоская регулярная решетка. Ее изготавливают из совокупности параллельных и близко расположенных щелей и препятствий, которые наносятся алмазным резцом. Пусть ширина щели равна a , ширина

штриха-препятствия — b . Тогда величина $d = a + b$ будет называться *постоянной решетки*, или ее *периодом*.

Рассмотрим процесс распространения света в дифракционной решетке. Пусть плоский фронт монохроматического излучения достиг положения, совпадающего с плоскостью щелей решетки. С помощью линзы соберем все параллельные группы на экране. Выберем на экране произвольную точку A , в которой собирается пучок параллельных лучей, идущих в некотором направлении φ . Из рисунка 34.1 легко найти разность хода световых лучей, идущих от двух соседних щелей $\Delta = d \sin \varphi$. Максимум в точке A будет наблюдаться, если $\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$. Тогда для дифракционной решетки справедлива следующая формула:

$$d \sin \varphi = k \lambda, \quad (34.1)$$

по которой можно рассчитать положение максимумов первого, второго и т. д. порядков. *Дифракционная картина* — это ряд цветных полос, разделенных темными промежутками. При белом свете в центре наблюдается светлое пятно, по краям которого расположены окрашенные спектры первого, второго и т. д. порядков. Причем чем больше длина волны (чем “краснее” свет), тем больше угол, под которым наблюдается максимум для этой волны. Если же на решетку направить, например зеленый свет, то все максимумы будут зеленого цвета. Из формулы (34.1) следует, что для длины волны может наблюдаться несколько максимумов: при $n = 0$ угол $\varphi = 0$ и мы получим максимум, который носит название *максимум нулевого порядка*; при $n = \pm 1$, $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{d}$ мы будем иметь *два максимума первого порядка*, расположенных симметрично по обеим сторонам нулевого максимума; $\sin \varphi = \frac{2\lambda}{d}$ при $n = \pm 2$ и мы получим *два симметричных максимума второго по-*

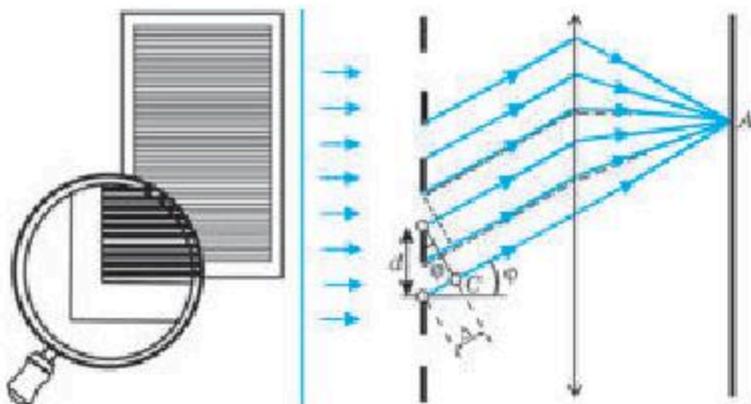


Рис. 34.1

рядка и т. д. Отсюда следует, что максимумы первого порядка видны под определенным углом φ_1 , максимумы второго порядка — под углом φ_2 , который больше угла φ_1 . Если период решетки мал, то соответствующие значения углов φ велики, как велика и разность двух значений для волн разной длины. А это означает, что *уменьшение периода решетки приводит к увеличению углового расстояния между максимумами различных длин волн, и тогда с помощью такой дифракционной решетки можно более четко разделить длины волн, т. е. качество решетки становится выше, а максимумы — резче.*

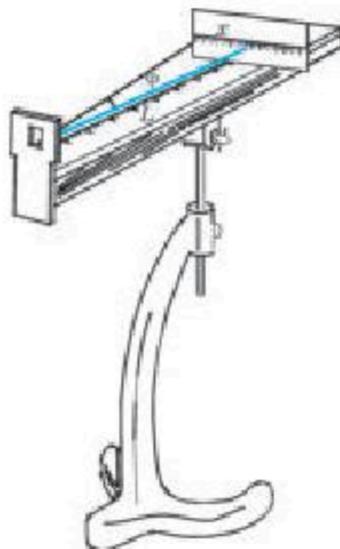


Рис. 34.2

Современные решетки содержат до 1200 штрихов на 1 мм. Хорошие решетки получают, проводя тонким резцом параллельные штрихи на поверхности металлического зеркала. Эти решетки называются *отражательными*. Для изготовления *прозрачной решетки* прочерчивают штрихи на поверхности стеклянной пластинки.

Определение длины световой волны. Для того чтобы определить длину световой волны, воспользуемся следующим прибором (рис. 34.2). На одном из концов длинной линейки с миллиметровыми делениями крепится черный экран, который можно перемещать по всей длине линейки. Посередине экрана имеется прорезь. На другом конце линейки помещают дифракционную решетку. Глядя сквозь решетку и прорезь на источник света, мы увидим на черном фоне экрана по обе стороны прорези дифракционные спектры первого, второго и т. д. порядков. Используя формулу дифракционной решетки и учитывая то, что для малых углов $\sin\varphi = \operatorname{tg}\varphi$ (рис. 34.1), рассчитаем длину световой волны:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k} = \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{k} = \frac{dx}{kL}, \quad (34.2)$$

где d — период решетки; x — расстояние от прорези до линии спектра определяемой длины волны, L — расстояние от дифракционной решетки до экрана по линейке.



1. Что называется дифракционной решеткой?
2. Как рассчитать период дифракционной решетки?
3. Как изменяется качество дифракционной картины от решетки с изменением периода решетки?
4. Как определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки?

Пример решения задачи

Каков период дифракционной решетки d , если при нормальном падении на нее лучей с длиной волны $\lambda = 750$ нм на экране, отстоящем от решетки на расстоянии $L = 1$ м, максимумы первого порядка отстоят друг от друга на расстоянии $x = 15$ см? Каково число штрихов N на $l = 1$ мм решетки? Какое количество m максимумов дает эта решетка? Каков максимальный угол φ_{\max} отклонения лучей, соответствующих последнему дифракционному максимуму?

Дано:

$$L = 1 \text{ м}$$

$$k = 1$$

$$l = 1 \text{ мм}$$

$$\lambda = 750 \text{ нм}$$

$$x = 15 \text{ см}$$

СИ

$$1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$750 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d \text{ — ? } \quad N/l \text{ — ?}$$

$$m \text{ — ? } \quad \varphi_{\max} \text{ — ?}$$

Решение. Условие максимума для дифракционной решетки выглядит так:

$$d \sin \varphi = k \lambda, \quad (34.3)$$

где d — период решетки; φ — угол, под которым наблюдается дифракционный максимум данного порядка; k — порядок дифракционного максимума; λ — длина волны падающего света. В нашем случае $k = 1$.

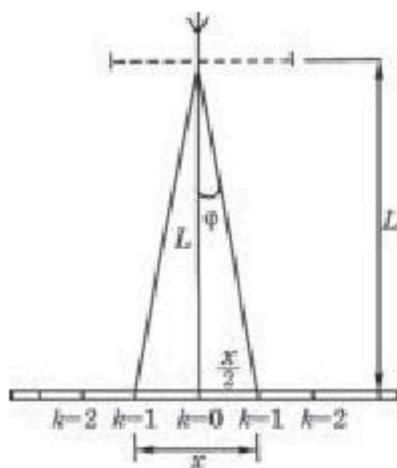


Рис. 34.3

Изобразим данную ситуацию на рисунке 34.3. Из условия задачи видно, что $\frac{x}{2} < L$, а это означает, что угол φ , под которым виден дифракционный максимум, мал. А для малых углов справедливо следующее соотношение: $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi$. Из рисунка 34.3 видно, что $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{2L}$. Тогда формула (34.2) переписывается так: $\lambda = \frac{d \cdot x}{2L}$.

Отсюда можно найти период решетки:

$$d = \frac{2L\lambda}{x}.$$

Подставив численные значения физических величин, получим, что порядок дифракционной решетки равен:

$$d = \frac{2 \cdot 1 \text{ м} \cdot 750 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{15 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 10 \text{ мкм}.$$

Длина дифракционной решетки равна периоду решетки, умноженному на число штрихов, нанесенных на решетку: $l = N \cdot d$. Отсюда получим, что $\frac{N}{l} = \frac{1}{d}$.

Подставив численные значения, предварительно имеем, что на 1 м на-

несено $\frac{N}{l} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = \frac{10^6}{10} = 10^5 \text{ м}^{-1}$. На 1 мм штрихов будет в 1000 раз меньше, т. е. $\frac{N}{l} = 100 \text{ мм}^{-1}$.

Для определения порядка последнего максимума необходимо учесть, что максимальный угол отклонения лучей после прохождения дифракционной решетки не может превышать 90° . Тогда, используя формулу для дифракционного максимума, получим:

$$d \sin 90^\circ = k_{\max} \lambda.$$

Отсюда следует, что $k_{\max} = \frac{d}{\lambda}$. Подставив численные значения, получим: $k_{\max} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{75 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 13,3 \approx 13$. Округляем в меньшую сторону так, чтобы полностью наблюдалось только 13 максимумов как справа, так и слева от центрального максимума. Следовательно, общее число максимумов, даваемых данной дифракционной решеткой, будет равно:

$$m = 2k_{\max} + 1 = 27.$$

Теперь определим максимальный угол отклонения лучей, соответствующий последнему дифракционному максимуму. Для этого снова обратимся к формуле (1): $d \sin \varphi_{\max} = k_{\max} \cdot \lambda$. Отсюда следует, что $\sin \varphi_{\max} = \frac{k_{\max} \cdot \lambda}{d}$. Подставим численные значения:

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{13 \cdot 750 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{10 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 0,975.$$

Тогда угол $\varphi_{\max} = 77^\circ$.



При изготовлении искусственных перламутровых пуговиц на их поверхность наносится мельчайшая штриховка. Почему после такой обработки пуговица имеет радужную окраску?



Упражнение 16

1. При освещении дифракционной решетки светом с длиной волны 590 нм спектр третьего порядка виден под углом 10° . Определите длину волны, для которой спектр второго порядка будет виден под углом 6° .
Ответ: 533 нм.
2. Определите длину волны для линии в дифракционном спектре третьего порядка, совпадающей с изображением линии в спектре четвертого порядка с длиной волны 490 нм.
Ответ: 653 нм.
3. Какой наибольший порядок спектра можно видеть в дифракционной решетке, имеющей 100 штрихов на 1 мм, при освещении ее светом с длиной волны 720 нм?
Ответ: 13.

4. Расстояние между экраном и дифракционной решеткой, имеющей 125 штрихов на 1 мм, равно 2,5 м. При освещении решетки светом с длиной волны 420 нм на экране видны синие линии. Определите расстояние от центральной линии до первой линии на экране.

Ответ: 13 см.

§ 35. Дисперсия света



Ключевые понятия:

- ✓ спектр
- ✓ дополнительные цвета
- ✓ светофильтры

На этом уроке вы:

- узнаете, что такое дисперсия;
- объясните образование радуги.



Человечество издавна интересовал вопрос о цветах различных тел. Причем до Ньютона в этом вопросе царила полная неопределенность. Считалось, что цвет — это свойство самого тела, хотя при внимательном наблюдении можно обнаружить, что при изменении условий освещения меняется цвет тела. Существовало и другое мнение, заключавшееся в следующем: различные цвета получаются при смешивании света и темноты. Цвета радуги связывались с дождевыми каплями. Игра цветов в ограненных алмазах или стеклянных призмах тоже была хорошо известна. Но никто до Ньютона не пытался сопоставить эти явления и найти связь между ними. В 1666 г. им был проведен эксперимент, противоречащий практически всем теориям цвета, существовавшим в то время. Прочитируем собственное описание Ньютоном этого опыта.

“В 1666 г. (когда я стал шлифовать оптические стекла несферической формы) я раздобыл себе треугольную стеклянную призму для того, чтобы с ее помощью попробовать проверить известные явления цвета. Для этой цели я затемнил мою комнату и сделал очень маленькое отверстие в ставне для пропуска соответствующего количества солнечного света. Я поместил мою призму у этого отверстия таким образом, чтобы она преломляла свет на противоположную стенку. Мне доставляло большое удовольствие рассматривать живые и интенсивные цвета, получающиеся таким образом”.

*Полосу, состоящую из различных цветов, которые получаются в результате прохождения света от источника через призму, Ньютон назвал спектром (от лат. *spektrum* — “видение”) (рис. 35.1).*

Ньютон был озадачен двумя особенностями этого эксперимента. Почему белый свет, входящий в призму, выходил из нее окрашенным? И почему падающий круглый пучок оказывался продолговатым после



Рис. 35.1

преломления в призме? Сравнив длину пучка с его шириной, он нашел, что длина в пять раз больше ширины. Объяснить это было трудно, но Ньютон в конце концов смог выделить каждый отдельный цвет солнечного спектра из всех других и заставил его преломляться через вторую призму. При этом он обнаружил, что разные цвета преломляются по-разному, например, красный цвет преломляется слабее других, а фиолетовый сильнее всех. Почему это происходило именно так, Ньютон не знал, но зато этот эксперимент объяснял образование продолговатости при преломлении света в призме.

Кроме того, этот эксперимент показал, что белый цвет — это сложный цвет. Он состоит из семи основных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Есть простая поговорка, позволяющая запомнить порядок расположения цветов в солнечном спектре: “Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан”. То, что белый цвет — это сложный цвет, доказывает еще один опыт, проведенный Ньютоном. Он взял круглый диск, на котором были нанесены основные семь цветов в виде секторов. Этот диск был укреплен на оси двигателя. При определенной скорости вращения цветной диск становился белым.

Открытое Ньютоном явление получило название *дисперсии света* (от лат. *dispergo* — “разбрасываю”, т. е. означает буквально “разброс”). Дисперсия света имеет два смысла: 1) *дисперсия* — это явление разложения белого сложного цвета в спектр; 2) *дисперсия* — это явление зависимости показателя преломления вещества от длины волны падающего света. Следовательно, одно и то же вещество имеет различный показатель преломления для разных длин волн.

Нам известно, что скорость света в вакууме равна 300000 км/с, а вот в других прозрачных средах она разная, причем меньше, чем в вакууме. Кроме того, скорость распространения световых волн красного цвета в любой среде максимальна, а скорость распространения световых волн фиолетового цвета минимальна. Так, например, в воде $v_{кр} = 228\ 000$ км/с, а $v_{ф} = 227\ 000$ км/с; в сероуглероде $v_{кр} = 185\ 000$ км/с,

а $v_{\phi} = 177\,000$ км/с. **В вакууме дисперсия света не происходит**, так как все световые волны там распространяются с одинаковой скоростью.

Открытие явления дисперсии позволило объяснить образование радуги. Преломление света в водяных капельках или ледяных кристалликах, парящих в атмосфере, сопровождается дисперсией в воде и льде солнечного света.

Различают **нормальную** и **аномальную** дисперсию света. Опыты показали, что в большинстве случаев **показатель преломления среды обратно пропорционален длине волны. Такая дисперсия называется нормальной.** Если же **показатель преломления среды прямо пропорционален длине волны, то дисперсия называется аномальной.**

Дополнительные цвета. Если из солнечного спектра изъять красный цвет, то в результате получится голубовато-зеленый свет; если голубой, то получится желтый свет; если удалить зеленый, то получится пурпурный. С другой стороны, если сложить голубовато-зеленый и красный цвета, то в результате опять получится белый свет. Точно так же желтый вместе с голубым цветом дают белый свет. **Два цвета, дающие при сложении белый свет, Ньютон назвал дополнительными цветами.**

Первичные цвета. В 1807 г. английский физик Томас Юнг сделал очень важное открытие. Он обнаружил, что белый цвет можно создать комбинацией красного, зеленого и голубого цветов. Кроме того, и другие цвета также можно получить, комбинируя красный, зеленый и голубой цвета. Красный, зеленый и голубой цвета были названы Юнгом **первичными цветами.** Ни один из этих первичных цветов не может быть получен никакой комбинацией других цветов. Это можно легко проверить, проектируя на белый экран пятна голубого, зеленого и красного цветов. В местах, где накладываются все три цвета, получим белый свет; там, где накладываются красный и голубой, получается пурпурный; там, где налагаются красный и зеленый, получаем желтый свет.

Цвета предметов. Опыт показывает, что цвет тела, освещаемого белым светом, зависит от того, лучи какого цвета это тело рассеивает. Если тело равномерно рассеивает все составные части белого света, то при обычном освещении оно кажется белым, например, лист бумаги. Если тело, например, сажа, поглощает весь падающий на него свет, то оно кажется черным. Кроме того, различные тела не только неодинаково рассеивают свет разного цвета, но и неодинаково пропускают свет через себя. Поэтому, когда мы рассматриваем прозрачные тела на просвет, они кажутся нам различно окрашенными. Такие тела называются **светофильтрами.**



1. Как объяснить появление радуги после дождя? Почему радуга имеет форму дуги?
2. Когда радуга бывает выше: в 4 или в 5 ч пополудни?
3. Можно ли увидеть радугу, находясь у одного ее конца? Ответ аргументируйте и сделайте выводы.



1. Опишите опыт, который проводил Ньютон с треугольной призмой.
2. Какое явление называется дисперсией?
3. Какие цвета называются дополнительными?
4. Какие цвета называются первичными?
5. Как объяснить цвета тел?
6. В каких случаях поверхность тела будет представляться нам красной, зеленой, белой, черной? Как это показать на опыте?
7. Как можно объяснить образование радуги? Почему иногда радуга бывает двойной?

§ 36. Поляризация света



Ключевые понятия:

- ✓ поляризаторы
- ✓ анализаторы
- ✓ поляроиды

На этом уроке вы:

- опишите и объясните явление поляризации.



Естественный и поляризованный свет. Нам с вами уже известно, что свет — это электромагнитные волны с длиной волны 400—700 нм. Каждый элементарный излучатель (атом) излучает электромагнитную волну с определенной ориентацией векторов напряженности электрического и магнитного полей. Но атомов в теле много и расположены они беспорядочно. Поэтому свет от них распространяется в различных направлениях, причем амплитуда колебаний по всем направлениям одинакова.

Свет, амплитуда колебаний которого по всем плоскостям одинакова, называется естественным, а свет, у которого энергия по разным плоскостям различна, называется частично поляризованным. Если же вся энергия света сосредоточена в одной плоскости, то свет называется полностью поляризованным. Плоскость, в которой совершаются колебания, называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость называется плоскостью поляризации.

*Выделение из световых колебаний в естественном свете определенного колебания называется поляризацией света. Приборы, предназначенные для получения поляризованного света, называются **поляризаторами**, а приборы, определяющие, какой это свет — естественный или поляризованный, — **анализаторами**. Устройство поляризатора и анализатора одинаково. Свет поляризуется как при отражении, так и при преломлении.*

Открытие поляризации света. Впервые явление поляризации было обнаружено в опытах, произведенных с кристаллами турмалина. Турмалин представляет собой кристалл буро-зеленого цвета, поэтому свет, проходя сквозь него, выходит темно-зеленым. Из кристалла турмалина были вырезаны одинаковые прямоугольные пластинки. При этом одна из сторон прямоугольника совпадает с определенным направлением внутри кристалла, которое носит название *оптическая ось*. Если эти пластинки расположить так, чтобы их оптические оси совпали, и пропустить через них узкий пучок света, то на экране мы получим темно-зеленое пятнышко. Если мы будем вращать одну из пластинок, оставляя вторую неподвижной, то обнаружим, что освещенность экрана в месте падения света будет уменьшаться, а при повороте на угол 90° пятнышко исчезнет совсем. При дальнейшем повороте пластинки освещенность снова будет возрастать, и при повороте на угол 180° она станет максимальной. При этом оптические оси пластинок снова станут параллельными. Когда же оптические оси пластинок перпендикулярны, то освещенность экрана минимальна (световое пятно исчезает). Было отмечено, что направление вращения пластинок не играет никакой роли. В каком бы направлении мы не вращали пластинку, явление происходит одинаково.

Как же объяснить это явление? Можно высказать следующее предположение: свет, проходящий сквозь первую пластинку турмалина, приобрел какие-то новые свойства. Нам с вами известно, что свет представляет собой электромагнитные волны. А эти волны — поперечные: плоскости колебаний напряженностей электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны, при этом они перпендикулярны направлению распространения волны. Световой пучок, идущий от источника света, симметричен относительно луча, т. е. его колебания происходят в плоскостях всех возможных направлений. А после прохождения через кристалл турмалина симметричность нарушается. Значит, кристалл турмалина обладает избирательностью к пропусканию света в определенных плоскостях (например, параллельно или перпендикулярно его оптической оси). Второй же кристалл позволяет определить эту особенность светового пучка, прошедшего через первый кристалл.

Следовательно, явление поляризации можно объяснить, если выдвинуть следующие предположения.

1. Кристалл турмалина обладает свойством пропускать световые колебания только в том случае, если их плоскость колебаний расположена определенным образом по отношению к его оптической оси.

2. Световые колебания в световом пучке направлены перпендикулярно линии распространения света, т. е. световые волны — это поперечные волны.

3. Свет, распространяющийся от обычного источника света, содержит колебания, происходящие в различных плоскостях, причем в равной мере.

Третье предположение объясняет, почему естественный свет одинаково хорошо проходит через кристалл турмалина при любой его ориентировке. Ведь при любой ориентировке кристалла турмалина в естественном свете всегда окажется одна и та же доля колебаний, плоскость колебаний которых совпадет с направлением, пропускаемым кристаллом турмалина (рис. 36.1). Прохождение естественного света через турмалин (*поляризатор*) приводит к тому, что из всех возможных плоскостей колебаний отбираются только те, которые могут пропускаться турмалином (E_0). Поэтому свет, прошедший через турмалин, будет представлять собой совокупность поперечных колебаний в одной плоскости, определяемой ориентацией оптической оси кристалла турмалина. Этот свет и называется **поляризованным**, а плоскость колебаний в нем — **плоскостью колебаний поляризованного света**. Следовательно, первая пластинка поляризует свет, оставляя в пучке проходящего света колебания, происходящие только в одной плоскости — плоскости поляризации. Второй же кристалл турмалина (*анализатор*) полностью пропустит эти колебания только в том случае, когда плоскости поляризации обоих кристаллов совпадут, и не пропустит совсем, если эти плоскости будут перпендикулярны друг другу. Во всех остальных случаях свет будет проходить частично ($E_0 \cos \theta$), т. е. интенсивность проходящего света уменьшится.

Очень просто объяснить явление поляризации с помощью механической модели. Если взять упругий жгут и, закрепив один из его концов, заставить другой конец вращаться, то при размещении на его пути двух плоских поверхностей, разделенных узким зазором, колебания жгута, прошедшие через зазор, будут происходить только в одной плоскости. Если на пути этих колебаний поместить две другие параллельные плоскости с малым зазором, то в зависимости от ориентации вторых плоскостей колебания жгута будут либо проходить, либо гаситься.

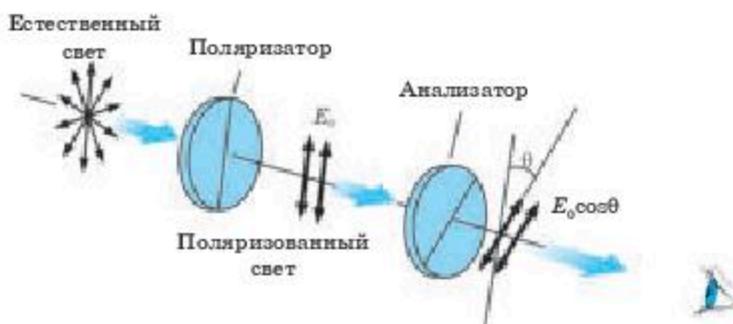


Рис. 36.1

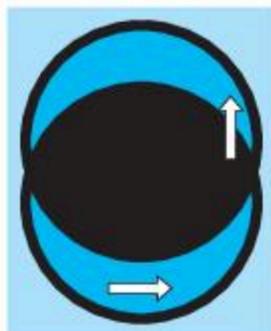
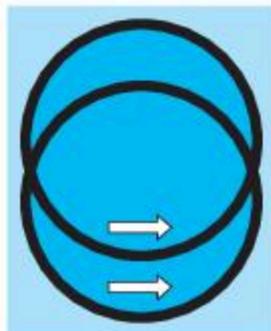


Рис. 36.2

Поляроиды. На практике оказалось, что поляризацию света могут осуществлять не только кристаллы турмалина, но и многие другие, например, исландский шпат, кристаллы которого пропускают одновременно два луча, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Некоторые кристаллы, типа турмалина, поглощают один из двух поляризованных лучей полностью, и поэтому через них проходит только один луч, поляризованный в определенном направлении. Такие кристаллы называются *дихроичными*. Существуют кристаллы, еще сильнее задерживающие один из поляризованных лучей. При этом их толщина может составлять 0,1 мм и даже меньше. Нанося такие пленки на целлулоид, получают поляризатор размером в несколько квадратных дециметров. Эти пластинки-пленки называются *поляроидами*. Они очень удобны в использовании. При вращении анализатора свет, проходящий через него, будет менять свою интенсивность (рис. 36.2).



1. Опишите и объясните явление поляризации света на кристаллах турмалина.
2. Какой свет называется естественным, а какой — поляризованным?
3. В чем состоит отличие поляризатора от анализатора?
4. Что происходит при вращении анализатора вокруг поляризатора? Почему?
5. Какие вещества называются поляроидами?

Самое важное в главе 6

- **Интерференция. Условие максимума:**

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda;$$

- **условие минимума:**

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

- Явление интерференции света применяют для проверки качества обработки поверхностей, просветления оптики, определения длины световой волны.

- Второе явление, присущее только волнам, называется *дифракцией*. Оно заключается в том, что волны огибают препятствие. Наблюдать это явление можно только тогда, когда размеры препятствия соизмеримы с длиной волны. Дифракцию световых волн проще всего наблюдать с помощью особого прибора — *дифракционной решетки*, представляющей собой чередующиеся отверстия и препятствия. Используя *формулу дифракционной решетки* $dsin\alpha = k\lambda$, легко определить длину световой волны.

- Для поперечных световых волн характерно еще одно явление — *поляризация*, которое заключается в том, что естественный свет (его электромагнитные поля колеблются во всевозможных плоскостях) превращается в поляризованный (колебания происходят только в определенной плоскости). Явление поляризации можно обнаружить, используя поляризатор и анализатор.

- Для световых волн характерно еще одно явление — *дисперсия*, которое заключается в зависимости показателя преломления света от его цвета (частоты). Проявляется оно в разложении белого цвета на составляющие его цвета при прохождении света через призму. Благодаря дисперсии света можно объяснить происхождение цветов, образование радуги.

Глава 7. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

§ 37. Геометрическая оптика. Прямолинейное распространение света. Тени, затмения. Экспериментальное определение скорости света



Ключевые понятия:

- ✓ геометрическая оптика
- ✓ световой луч
- ✓ прямолинейное распространение света
- ✓ принцип Ферма
- ✓ методы определения скорости света

На этом уроке вы:

- познакомитесь с законом прямолинейного распространения света;
- научитесь применять принцип Ферма для вывода законов геометрической оптики, объяснять астрономические и лабораторные методы определения скорости света.



Геометрическая оптика — это раздел оптики, изучающий распространение света, не рассматривая его природу. Это абстрактная оптика, опирающаяся на законы геометрии.

Геометрическая оптика является частным случаем волновой оптики и применяется в тех случаях, когда размеры рассматриваемого участка волны велики по сравнению с длиной волны. Одним из основных понятий геометрической оптики является понятие *световой луч*. **Световой луч** — это линия, вдоль которой распространяется световая энергия, или линия, проведенная перпендикулярно волновому фронту и показывающая направление распространения волнового возмущения. Световой луч берет начало на источнике света.

Законы геометрической оптики были установлены экспериментально, в основном при наблюдениях за световыми лучами, и очень давно. В геометрической оптике существуют **четыре основных закона**, которые описывают распространение света.

1. **Закон прямолинейного распространения света:** луч света в однородной среде распространяется прямолинейно.

2. **Закон независимого распространения света:** световые лучи, встречаясь, не оказывают влияния на дальнейшее распространение друг друга.

3. **Закон отражения света:** 1) луч падающий 1, луч отраженный 2 и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) угол падения α равен углу отражения γ (рис. 37.1).

4. **Закон преломления света:** 1) луч падающий (1), луч преломленный (3) и перпендикуляр (2), восста-

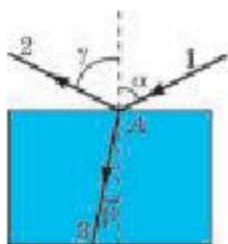


Рис. 37.1

новленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и называется *относительным показателем преломления* первой среды относительно второй:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (37.1)$$

Принцип Ферма. Законы прямолинейного распространения света в однородной среде, законы отражения и преломления света на границе раздела двух сред могут быть получены с помощью принципа Ферма, который был выдвинут в середине XVII в. французским ученым Пьером Ферма. Принцип Ферма заключается в следующем: *свет, идущий из одной точки пространства в другую, всегда распространяется по пути, для прохождения которого ему требуется экстремальное (как правило, минимальное) время.*

Применим принцип Ферма для доказательства закона прямолинейного распространения света. Расстояние вдоль прямой является кратчайшим расстоянием между двумя точками. Скорость света в однородной среде во всех точках одинакова. Следовательно, меньше всего времени для перехода из одной точки данной среды в другую свет потратит, двигаясь по прямой.

Теперь докажем закон отражения. Луч (1), вышедший из точки A , отражается от зеркала в некоторой точке C и приходит в заданную точку B (рис. 37.2). Согласно принципу Ферма, путь ACB , который прошел свет, должен быть пройден за минимальное время, а, следовательно, и быть короче любого другого, например, пути ADB . В однородной среде свет движется прямолинейно, а это значит, что свет от точки A до точки C шел по прямой и, отразившись от зеркала в этой точке, до точки B тоже шел по прямой. Для нахождения положения точки C отложим на опущенном из точки A перпендикуляре к зеркалу отрезок OA' , равный OA , и соединим точки A' и B прямой. Пересечение отрезка $A'B$ с поверхностью зеркала и даст положение точки C . Так как $AC = A'C$, то путь света ACB из точки A в точку B равен отрезку $A'CB$. Из рисунка 37.2 видно, что путь света через любую другую точку D равен $A'DB$ и длиннее $A'CB$, так как прямая $A'B$ — это кратчайшее расстояние между двумя точками A' и B . Из рисунка 37.2 видно, что именно такое положение точки C соответствует равенству углов падения и отражения: $\alpha = \gamma$.

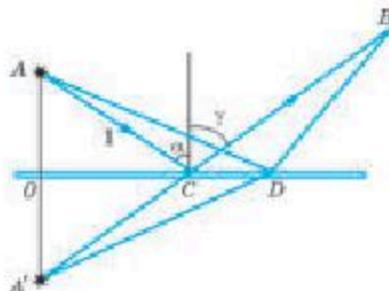


Рис. 37.2

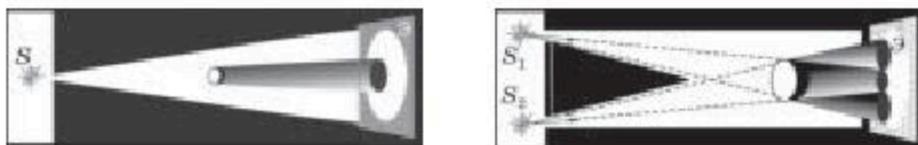


Рис. 37.3

Прямолинейное распространение света. Прямолинейное распространение света позволяет объяснить образование теней и полутеней. *Тень* — это область пространства за непрозрачным предметом, куда не попадает световая энергия. В яркий солнечный день отчетливо видны тени людей, деревьев, зданий и т. д. Если взять точечный источник света и на пути светового пучка, идущего от него, поместить непрозрачный предмет, то за предметом образуется расходящаяся конусообразная тень, а на экране появится тень, повторяющая контур предмета (рис. 37.3). Если источник света будет протяженным, то за предметом образуется сходящаяся конусообразная тень. Если же непрозрачный предмет освещается двумя источниками света, то образуется три тени. Одна из них полная тень, т. е. область пространства, куда не попадает свет ни от одного источника. Две другие тени менее темные, потому что в их область проникает свет от одного из источников. Эти тени называются *полутенями*.

Солнечные и лунные затмения. Закон прямолинейного распространения света позволил объяснить образование солнечных и лунных затмений. Планеты и их спутники, освещаемые Солнцем, отбрасывают тени и полутени. Так, например, максимальная длина конуса лунной тени 384 000 км, а конус земной тени простирается в пространстве на 33 млн. км. Если Луна при своем движении вокруг Земли окажется между Землей и Солнцем (1), то она может закрыть собой Солнце, и наступит солнечное затмение, которое может быть полным или частичным (рис. 37.4). Его видно только в тех местах, куда падает тень (полное затмение) или полутень Луны (частичное затмение). Полное солнечное затмение может продолжаться разное время, но обычно длится около 2—3 мин. Солнечные затмения наблюдаются только во время новолуний.

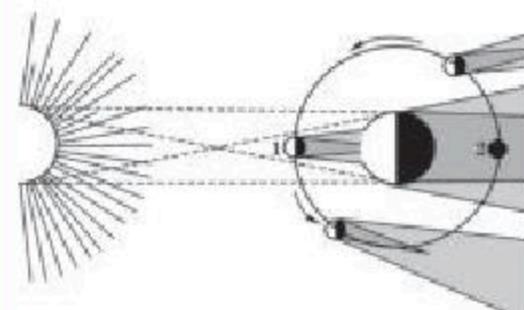


Рис. 37.4

Если бы Луна двигалась вокруг Земли по орбите, плоскость которой совпадала с плоскостью орбиты Земли при ее движении вокруг Солнца, то они случались бы каждое новолуние. Но плоскость лунной орбиты составляет

угол $5^{\circ}9'$ по отношению к плоскости земной орбиты, из-за чего солнечное затмение может произойти только тогда, когда Луна окажется вблизи пересечения плоскостей орбит Земли и Луны. Полное солнечное затмение наблюдается на Земле один раз в полтора года, но в одном и том же месте Земли происходит очень редко. Так как движение Земли и Луны хорошо изучено, то время затмений легко рассчитать.

Лунные затмения наблюдают тогда, когда Луна попадает в область (2) земной тени (рис. 37.4). Лунные затмения более продолжительны, чем солнечные, так как диаметр земной тени гораздо больше диаметра лунного диска. Лунные затмения могут продолжаться около часа. Происходят они во время полнолуний, когда Луна находится в противостоянии с Солнцем. Кстати, Луна во время затмений никогда не бывает темной, она имеет темно-красный цвет.



Во время полных лунных затмений Луна немного освещена красным светом. Почему?

Скорость света. Благодаря прямолинейному распространению света смогли измерить скорость света. Первую попытку определить скорость света еще в 1607 г. предпринял итальянский физик Галилео Галилей. На противоположных концах большой равнины он разместил двух наблюдателей со сверенными часами. У одного из них в руках был фонарь, который он зажигал, засекая при этом время по своим часам. А второй наблюдатель фиксировал промежуток времени, спустя который он увидел вспышку света. Опыт не удался, так как этот промежуток времени оказался слишком мал.

В 1675 г. датский астроном Оле Рёмер в Париже наблюдал за затмениями спутников Юпитера. Он составил таблицу, в которой было зафиксировано среднее время обращения каждого спутника вокруг Юпитера (рис. 37.5). При этом он обратил внимание на то, что, когда

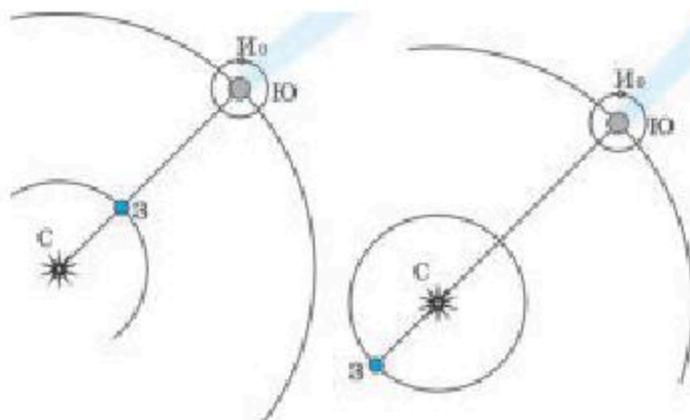


Рис. 37.5

Земля и Юпитер находятся на минимальном расстоянии друг от друга, затмения происходят почти на 22 мин раньше момента, вычисленного из среднего периода обращения. Когда же Земля и Юпитер находятся на максимальном расстоянии друг от друга, то затмения на столько же запаздывают. Рёмер сделал верный вывод, что эти отклонения возникают из-за того, что свет затрачивает некоторое время (1320 с) на прохождение расстояния, равного диаметру орбиты Земли вокруг Солнца. После этого он легко рассчитал скорость света:

$$c = \frac{2R_{\oplus}}{t} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}}{1320 \text{ с}} = 2,27 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Современные методы определения промежутка времени показали, что на прохождение расстояния, равного диаметру орбиты Земли, вокруг Солнца свет тратит 1000 с. С учетом этого мы получим, что скорость света равна: $c = 3 \cdot 10^5 \text{ км/с}$.

В 1722 г. английский астроном Джеймс Брайлей определил скорость света на основе открытого им явления *звездной абберации*. По его расчетам скорость света получилась равной 303 000 км/с.

Методы, которыми пользовались для определения скорости света Рёмер и Брайлей, получили названия *астрономические методы*. Но существуют еще и лабораторные методы определения скорости света.

Опыт Физо. В 1849 г. французский физик Арман Ипполит Луи Физо рассчитал скорость света в земных условиях. Для того чтобы точно определить скорость света, необходимо как можно точнее определять малые промежутки времени. Для измерения малых промежутков времени Физо предложил использовать зубчатое колесо с 720 зубчиками (рис. 37.6). Свет от источника света *И* направлялся на полупрозрачное зеркало *А*, которое разбивало его на два луча. Отраженный луч попадал на зубчатое колесо, проходил через его отверстия, доходил до зеркала *З* и, отразившись от него, возвращался обратно и снова попадал на зубчатое колесо. Меняя частоту вращения колеса, можно добиться, чтобы свет проходил через зубчатое колесо и попадал на полупрозрачное зеркало *А*, отразившись от ко-



Рис. 37.6

того, попадал в зрительную трубу и в глаз наблюдателя Г. Чтобы получить такой эффект, необходимо, чтобы время, за которое свет проходит расстояние от колеса до зеркала З и обратно, было равно времени поворота колеса на ширину зубца. Первое время найдем так: $t = \frac{2l}{c}$, где l — расстояние от колеса до зеркала З; c — скорость света. Если частота вращения колеса равна ν , то время поворота колеса на ширину зубца будет равно $r = \frac{1}{2\nu n}$, где n — число зубцов на колесе. Тогда $t = r$;

$$c = \frac{2l}{\tau} = \frac{2l}{\frac{1}{2\nu n}} = 4\nu n l.$$

В опытах Физо расстояние l было равно 8,6 км. Произведя расчеты, ученый получил, что скорость света равна 313000 км/с. Для того времени это был очень неплохой результат.

Кроме перечисленных опытов по определению скорости света, существуют еще и методы Фуко (использовалось вращающееся зеркало, которое совершало 800 об/мин), метод с применением эффекта Керра (на основе поляризации света).

Опыт Майкельсона. В 1923 г. американский физик Альберт Абрахам Майкельсон усовершенствовал *метод вращающегося зеркала*. Схема его установки показана на рисунке 37.7. Световой пучок от источника света (1) проходит через диафрагму (2) и фокусирующую систему (3) и попадает на грань a_1 вращающегося восьмигранного зеркала. Отразившись от этой грани, световой пучок попадает на зеркало (4) и затем направляется через систему зеркал (4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → 10) до грани a_2 восьмигранного зеркала. Отразившись от этой грани, свет приходит в зрительную трубу (11). Вогнутые зеркала (6) и (7) располагались на вершинах двух гор, между которыми было 35373,21 м. Восьмигранное зеркало совершает 528 об/с. За то время, в течение которого свет проходит удвоенное расстояние между горами, зеркало

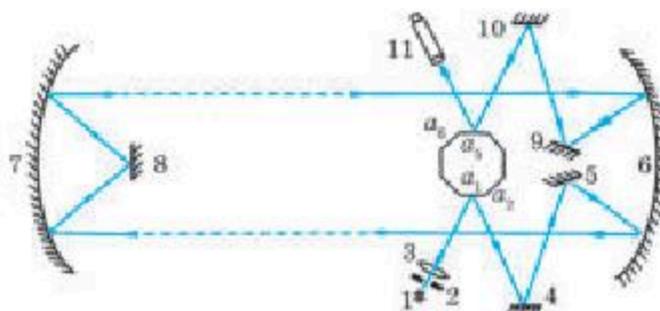


Рис. 37.7

поворачивается на $1/8$ оборота, так что на месте грани a_5 оказывается грань a_6 , и в зрительной трубе виден свет. Продолжительность $1/8$ оборота составляет $t = \frac{1}{8v} = \frac{1}{8 \cdot 528} c = 236,7$ мс. Расстояние, пройденное светом $l = 2 \cdot 35373,21 \text{ м} = 70\,746,42$ м. Скорость света будет равна $c = \frac{l}{t} = (299796 \pm 4)$ км/с. По современным данным, скорость света в вакууме равна $299\,792\,458 \pm 0,3$ м/с.



1. О чем говорит закон прямолинейного распространения света?
2. Что называется тенью?
3. Как, используя закон прямолинейного распространения света, объяснить образование теней и полутеней?
4. Почему тени на Луне четкие и черные, а на Земле — размытые и серые?
5. Что надо сделать, чтобы во время операции тени от рук хирурга не закрывали оперируемое место?
6. Расскажите, почему происходит солнечное затмение. При каких условиях солнечное затмение будет полным? Как часто происходят солнечные затмения?
7. Какие затмения называются лунными? Почему они происходят? В какие фазы Луны они возможны?
8. Если на Земле наблюдается полное лунное затмение, то что будут наблюдать космонавты, находящиеся в это время на Луне?
9. Каким образом определил скорость света Рёмер?
10. Как определил скорость света Физо? В чем состояла основная сложность его эксперимента? Для каких целей Физо использовал зубчатое колесо?
11. Расскажите, каким образом Майкельсон определил скорость света. В чем состоит преимущество его эксперимента?

§ 38. Явление отражения света. Плоские и сферические зеркала



Ключевые понятия:

- ✓ отражение света
- ✓ плоское и сферическое зеркала
- ✓ замечательные лучи



На этом уроке вы:

- научитесь строить изображение в плоских и сферических зеркалах;
- применять формулы плоского и сферического зеркала при решении задач;
- выведете закон отражения света, основываясь на принципе Гюйгенса.

Явление отражения света. *Отражением света называется явление изменения направления хода светового луча, наблюдаемое на границе двух сред. При этом луч света возвращается в исходную среду. Рассмотрим это явление подробнее. На рисунке 38.1 изображены два параллельных луча света (1) и (2), падающих на полупрозрачную пластинку под углом α .*

Пусть они отражаются под некоторым углом γ . Определим величину этого угла. Скорость распространения света в первой среде равна v_1 . Теперь обратимся к рисунку 38.1, а и б. В тот момент, когда луч (1), попав на границу двух сред в точке А, отразится и продолжит свое движение в направлении луча 1', луч 2 будет находиться в точке D (рис. 38.1, а). За тот промежуток времени, пока луч 1' дойдет до точки С, луч 2 от точки D доберется до точки В (рис. 38.1, а), расположенной на границе двух сред так же, как и точка А. Путь, который при этом пройдет луч 1', будет равен $AC = v_1 t$; путь, который пройдет луч 2, будет равен $DB = v_1 t$. То есть отрезки AC и DB равны. Тогда треугольники ACB и ADB (рис. 38.1, а и б) равны друг другу, так как у них равны две стороны: $AC = DB$, сторона AB общая, а стороны CB и AD перпендикулярны сторонам DB и AC и тоже равны; $\angle ACB = \angle ADB$. В равных треугольниках против равных сторон лежат равные углы, следовательно, $\varphi = \varphi_1$, так как лежат против равных сторон DB и AC . Нам известно, что сумма внутренних углов любого треугольника равна 180° . Тогда для треугольника ADB (рис. 38.1, в) имеем:

$$\varphi + 90^\circ + (90^\circ - \alpha) = 180^\circ, \text{ т. е. } \varphi = \alpha.$$

А для треугольника ACB (рис. 38.1, в) получим:

$$\varphi_1 + 90^\circ + (90^\circ - \gamma) = 180^\circ, \text{ т. е. } \varphi_1 = \gamma.$$

Выше мы доказали, что $\varphi = \varphi_1$, следовательно, $\alpha = \gamma$. Второй закон отражения (*угол падения равен углу отражения*) доказан. Различают два вида отражения: *правильное* (или *зеркальное*) и *рассеянное* (диффузное). **Правильное, или зеркальное, отражение** — это отражение, которое происходит от идеально гладкой, отполированной поверхности (неровности этой поверхности малы по сравнению с длиной волны света). Различные зеркальные поверхности имеют различную интенсивность отражения. Так, например, серебряное отполированное зеркало отражает 96% падающего света, а гладкая отполированная черная поверхность отражает всего 1% световой энергии. **Рассеянное, или диффузное, отражение** — это отражение, происходящее от шероховатой поверхности (у такой поверхности неровности велики). При

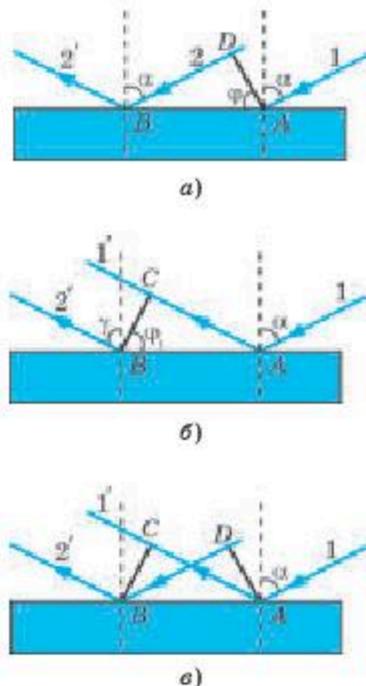


Рис. 38.1

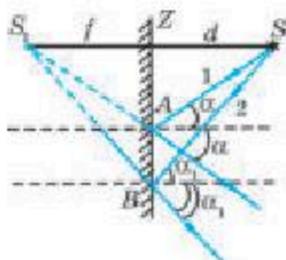


Рис. 38.2

диффузном отражении параллельный пучок света отражается под разными углами, рассеиваясь во все стороны. *Поверхность, равномерно рассеивающая свет во все стороны, называется матовой.* Таких поверхностей нет, но есть близкие к ним, например мел.

Если смотреть на шероховатую поверхность любого тела, освещенную светом, то мы видим эту поверхность; если же смотреть на зеркальную поверхность чистого зеркала, то мы ее не видим, зато видим в зеркале свое изображение и изображение окружающих предметов. Именно поэтому поверхности экранов, на которые проектируются кинофильмы, делаются не зеркальными, а шероховатыми. Лучше всего свет рассеивается от поверхностей с очень малыми неровностями, например, от чертежной или писчей бумаги, гипса, мела и т. п. Кроме того, свет сильно рассеивает частицы пыли или тумана. Рассеянный свет меньше утомляет глаз человека, чем отраженный.

Плоское зеркало. Явление зеркального отражения очень широко используется в зеркалах. Зеркала бывают плоскими и сферическими. *Плоским зеркалом называется гладкая отполированная поверхность, покрытая отражающим слоем, с радиусом кривизны, стремящимся к бесконечности.* Построим изображение светящейся точки S в плоском зеркале Z (рис. 38.2). Направим на зеркало два луча 1 и 2. Они оба отражаются от зеркала, а нам кажется, что они выходят из точки S_1 , которая и будет изображением светящейся точки S .

Попробуйте самостоятельно доказать, что расстояние от светящейся точки S до зеркала Z равно расстоянию от зеркала Z до изображения светящейся точки S_1 , т. е. докажите, что

$$d = -f. \quad (38.1)$$

Это формула плоского зеркала. Для вывода формулы плоского зеркала воспользуйтесь законами отражения света и знаниями по геометрии. Плоское зеркало дает мнимое изображение предмета, поэтому в формуле перед расстоянием от зеркала до изображения стоит знак “-”. Недостатком изображения в плоском зеркале является его зеркальная симметрия (рис. 38.3).

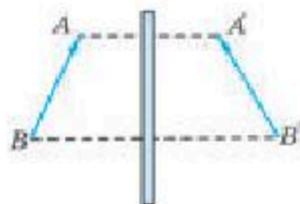


Рис. 38.3

Плоское зеркало применяют для зеркального отсчета. Допустим, что нам необходимо измерить малую величину. Пусть луч света падает на зеркало под углом 90° (рис. 38.4), тогда отраженный

луч пойдет в этом же направлении, но в обратную сторону. Если зеркало повернулось на угол φ , то луч отклонится на угол 2φ . Причем $\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{d}{l}$. Если угол очень мал, то зеркало помещают в тубус микроскопа.

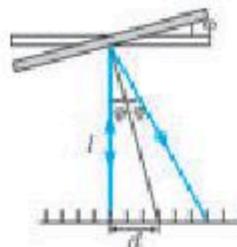


Рис. 38.4

Интересно рассмотреть такой случай: перед двумя взаимно перпендикулярными зеркалами расположен источник света (рис. 38.5). Сколько изображений источника мы увидим? Эксперимент показывает, что изображений будет три. Как же это объяснить? Пусть S' — это изображение светящейся точки S в первом зеркале, S'' — это изображение светящейся точки во втором зеркале, S''' — это изображение изображения S' во втором зеркале. Оно совпадает с изображением изображения S'' в первом зеркале. Итого получилось три изображения, которые расположены на окружности, центр которой расположен в точке O . Тогда легко получить формулу для расчета числа изображений в двух взаимно перпендикулярно расположенных зеркалах:

$$N = \frac{360^\circ}{90^\circ} - 1 = 3.$$

В общем случае, когда зеркала расположены друг к другу под произвольным углом, число изображений находится по формуле:

$$N = \frac{360^\circ}{\alpha} - 1. \tag{38.2}$$

Проверьте это на опыте.

Плоские зеркала устанавливают в *перископах* — оптических приборах, предназначенных для наблюдений из укрытий.

Сферические зеркала. Зеркала, имеющие искривленную отражающую поверхность, называются *кривыми*. Одним из видов кривых зеркал являются *сферические зеркала*, отражающая поверхность которых представляет собой либо вогнутую, либо выпуклую поверхность.

Рассмотрим вогнутое сферическое зеркало. У любого сферического зеркала есть вершина O — это средняя точка сферы. *Оптической осью*

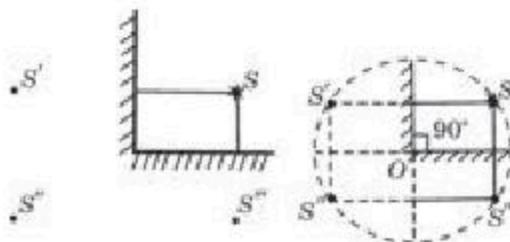


Рис. 38.5

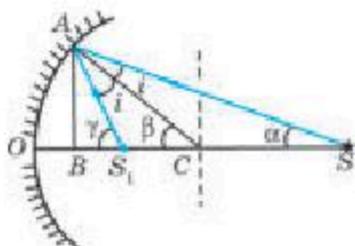


Рис. 38.6

сферического зеркала называется **прямая, проходящая через вершину зеркала и через центр его кривизны.**

Рассмотрим рисунок 38.6. Пусть S — это светящаяся точка, находящаяся на оптической оси зеркала; S_1 — изображение светящейся точки; i — угол между радиусом кривизны сферического зеркала и падающим лучом,

т. е. это угол падения луча, так как радиус кривизны сферы всегда перпендикулярен ее поверхности; β — угол между оптической осью и радиусом кривизны зеркала; α — угол между падающим лучом и оптической осью; γ — угол между отраженным лучом и оптической осью. Обозначим $OS = d$, $OS_1 = f$, $OC = r$, $AB = h$. Так как точка S_1 получена в результате пересечения отраженных лучей, то мы имеем дело с действительным изображением светящейся точки. Прямая AB перпендикулярна главной оптической оси зеркала OC .

Рассмотрим треугольник ASC . Для этого треугольника угол β является внешним углом. Воспользуемся следующей теоремой: внешний угол треугольника равен сумме внутренних углов, не смежных с ним. Тогда будет справедливо соотношение $\beta = \alpha + i$. Для треугольника SAS_1 угол γ тоже внешний, следовательно, будет справедливо соотношение $\gamma = \alpha + 2i$. К обеим сторонам последнего равенства прибавим угол α и получим, что $\gamma + \alpha = 2\alpha + 2i$. Но так как $\beta = \alpha + i$, то получим, что $\gamma + \alpha = 2\beta$. Будем рассматривать параксиальные лучи, составляющие с главной оптической осью малые углы, тогда AB будет перпендикулярна OS , а из прямоугольного треугольника ASB получим, что $\operatorname{tg}\alpha \approx \alpha = h/d$, из треугольника ABC получим, что $\operatorname{tg}\beta \approx \beta = h/r$, а из треугольника ABS_1 имеем $\operatorname{tg}\gamma \approx \gamma = h/f$. Подставив эти выражения в формулу $\gamma + \alpha = 2\beta$, получим:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \quad (38.3)$$

Эта формула называется **формулой сферического зеркала.**

Пусть светящаяся точка находится в бесконечности, тогда $d \rightarrow \infty$ и $\frac{1}{d} = 0$. Следовательно,

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{r} \text{ или } f = \frac{r}{2}.$$

Постоянная точка $\frac{r}{2}$, в которой собираются лучи от далеких предметов, т. е. лучи, идущие параллельно главной оптической оси, называется главным фокусом сферического зеркала, а расстояние от вершины зеркала до фокуса — фокусным расстоянием зеркала:

$$F = \frac{r}{2}.$$

Тогда формула сферического зеркала переписывается так:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (38.4)$$

Если $r \rightarrow \infty$, то вместо сферического зеркала имеем плоское, следовательно, мы получим, что $d = -f$ — формула плоского зеркала.

Проанализируем формулу (38.4). Для этого перепишем ее:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d}.$$

Если $d > F$, т. е. предмет находится за фокусом зеркала, то $\frac{1}{f} > 0$ и $f > 0$. Следовательно, мы получим действительное изображение, т. е. изображение будет находиться перед зеркалом. Если же $d < F$, то $f < 0$, то мы имеем мнимое изображение, т. е. изображение, которое находится за зеркалом.

Если лучи будут падать на зеркало параллельным пучком, идущим не параллельно главной оптической оси зеркала, то после отражения они будут собираться не в главном фокусе, а в фокальной плоскости. **Фокальная плоскость зеркала** — это плоскость AB , проходящая через фокус перпендикулярно его главной оптической оси зеркала (рис. 38.7).

Выпуклое зеркало (рис. 38.8) всегда дает мнимое изображение ($f < 0$). Для этого зеркала фокус мнимый ($F < 0$), так как собираются не сами лучи, а их продолжения (зеркало рассеивает световые лучи). С учетом этого формула выпуклого сферического зеркала записывается так:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (38.5)$$

Для построения изображения в сферическом зеркале используют три замечательных луча (рис. 38.9):

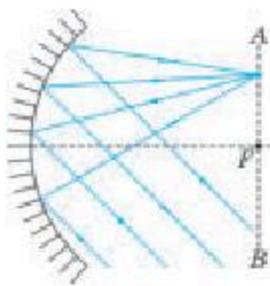


Рис. 38.7

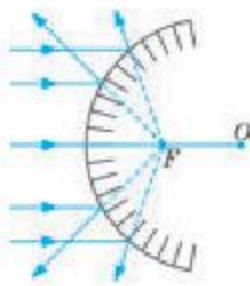


Рис. 38.8

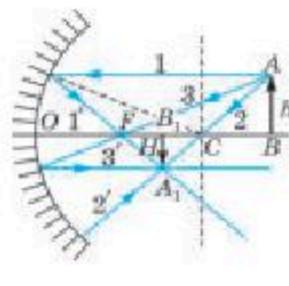


Рис. 38.9

1. Луч 1, идущий параллельно главной оптической оси зеркала, который после отражения от его поверхности проходит через фокус зеркала (луч 1').

2. Луч 2, идущий через центр кривизны зеркала, после отражения от его поверхности идет в том же направлении (луч 2').

3. Луч 3, идущий через фокус зеркала, который после отражения от его поверхности идет параллельно главной оптической оси (луч 3').

При построениях в сферических зеркалах нужно помнить, что надо пользоваться параксиальными лучами. Повторяем, что *параксиальные лучи* — это лучи, падающие на зеркало под малыми углами.

Сферическое зеркало дает увеличенное или уменьшенное изображение предмета. *Под увеличением зеркала понимают физическую величину, равную отношению линейного размера изображения к линейному размеру предмета* (рис. 38.9). Пусть $AB = h$, а $A_1B_1 = H$, тогда

$$\Gamma = \frac{H}{h}.$$

Как показали расчеты, увеличение сферического зеркала связано с расстояниями предмета до вершины зеркала $BO = d$ и от изображения до вершины зеркала $OB_1 = f$. Тогда увеличение зеркала будет равно:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}. \quad (38.6)$$

Широкое применение получили параболические вогнутые зеркала, которые пучок параллельных лучей света, падающих на поверхность параболического зеркала, практически собирают в одну точку. Если же в фокус такого зеркала поместить лампу, то мы получим пучок параллельных лучей. Это используется в автомобильных фарах, прожекторах. Вогнутые зеркала применяются в телескопах-рефлекторах, с помощью которых изучаются звездное небо, планеты и другие небесные тела.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Если внимательно присмотреться, то в глазу собеседника можно увидеть свое изображение в прямом и уменьшенном виде. Как возникает это изображение? Поверхность роговицы глаза в этом случае выступает как выпуклое зеркало и изображение возникает на поверхности роговицы глаза.



1. Какое явление называется отражением света? Каким законом оно подчиняется?
2. Выведите законы отражения света.
3. Какие виды отражения вы знаете?
4. Какое зеркало называется плоским?
5. Выведите формулу плоского зеркала.
6. Какое изображение дает плоское зеркало?
7. Может ли плоское зеркало давать действительное изображение?
8. Карандаш находится на расстоянии 25 см от плоского зеркала. На каком расстоянии от карандаша окажется его изображение, если карандаш отодвинуть на 10 см от зеркала?
9. Как изменится расстояние между предметом и его изображением в плоском зеркале, если зеркало расположить там, где было мнимое изображение предмета?
10. Как устроен зеркальный перископ? Начертите схему его устройства и ход лучей в нем.
11. Сколько изображений мы получим, если два плоских зеркала образуют двугранный угол 60° , 30° ?
12. Сколько изображений дадут два взаимно параллельных плоских зеркала?
13. Какое из сферических зеркал рассеивает свет, а какое собирает падающий параллельный пучок в одну точку? Как называется эта точка?
14. У какого сферического зеркала фокус мнимый, а у какого — действительный?
15. Какое изображение называется действительным?
16. Перечислите замечательные лучи, позволяющие строить изображение в сферическом зеркале.
17. Что вы понимаете под увеличением зеркала?
18. Перечислите известные вам примеры использования плоских, сферических зеркал, а также матовых поверхностей.

Примеры решения задач

1. Предмет AB и зеркало CD расположены так, как показано на рисунке 38.10, *а*. Постройте изображение предмета AB в зеркале. Где следует расположить глаз, чтобы увидеть изображение всего предмета?

Решение. Лучи, исходящие из точки A , после отражения от зеркала будут распространяться внутри полосы, ограниченной прямыми CC_1 и DD_1 (рис. 38.10, *б*). Лучи, исходящие из точки B , будут распространяться внутри полосы, ограниченной прямыми CC_2 и DD_2 (это легко определить, если воспользоваться законами отражения). Только между прямыми CC_1 и DD_2 в каждой точке пространства будут встречаться лучи, исходящие от всех точек предмета. Глаз может видеть изображение всего предмета в случае, если он будет находиться внутри полосы, заключенной между лучами CC_1 и DD_2 . Из этой задачи следует другая частная задача: где нужно расположить плоское зеркало, чтобы человек увидел себя в полный рост?

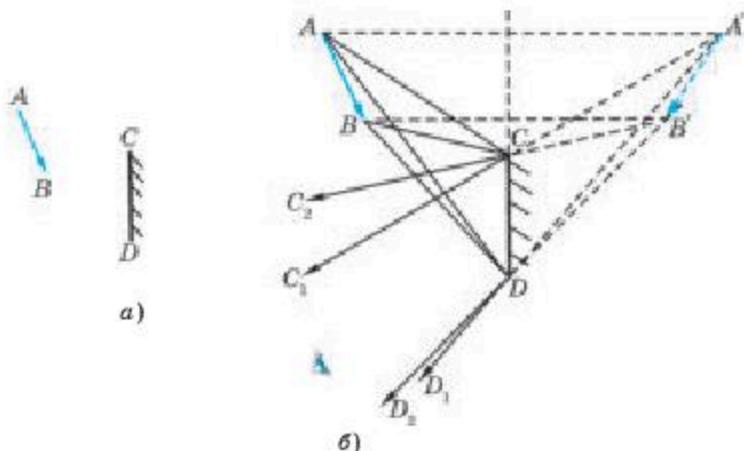


Рис. 38.10

2. Солнечные лучи, отражаясь от горизонтально лежащего зеркала, падают на вертикальный экран. На горизонтальном зеркале расположен плоский предмет. Опишите характер тени на вертикальном экране.

Решение. Обозначим высоту предмета через h , а через L — расстояние от предмета до экрана. Пусть свет падает на зеркало под углом α . Рассмотрим два случая.

1) $l > 2h \cdot \operatorname{tg}\alpha$. Тогда на экране будут видны две тени, прямая и перевернутая, сложенные основаниями (рис. 38.11). Общая длина тени будет равна $2h$. Тень освещена солнечными лучами и выделяется по контрасту с остальными участками экрана, освещенными и прямыми, и отраженными лучами.

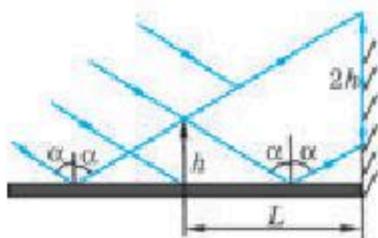


Рис. 38.11

2) $l < 2h \cdot \operatorname{tg}\alpha$. В этом случае длина тени будет меньше $2h$, причем на ней будут участки, не освещенные ни прямыми, ни отраженными лучами (докажите самостоятельно).



Упражнение 17

1. При каком условии плоское зеркало дает действительное изображение?
2. На какой угол повернется луч, отраженный от плоского зеркала, при повороте зеркала на 20° ?
3. Сколько изображений светящейся точки мы увидим в системе из двух плоских зеркал, образующих двугранный угол 60° ? Приведите графическое доказательство.

Ответ: на 40° .

Ответ: 5.

4. Высота Солнца составляет 50° . Как надо расположить плоское зеркало, чтобы: а) осветить дно колодца; б) направить солнечные лучи горизонтально?

Ответ: а) 70° ; б) 115° или 65° к горизонту.

5. Какую фотографию легче рассматривать: матовую или глянцевую? Почему?
6. Свет от точечного источника попадает на круглый непрозрачный диск диаметром 5 см. За диском параллельно ему расположен экран. Найти площадь тени на экране. Расстояние от источника до диска 1 м, от диска до экрана — 2 м.

Ответ: 177 см^2 .

7. В комнате высотой 3 м висит лампа на расстоянии 50 см от потолка. Лучи света лампы идут только вверх. Прямо над лампой на потолке расположено плоское зеркало диаметром 60 см. Найти диаметр светового зайчика на полу комнаты.

Ответ: 4,2 м.

8. Два зеркала образуют двугранный угол 72° . На одно из них падает луч света. Найти угол между первоначальным лучом и лучом, испытавшем по одному отражению в каждом из зеркал.

Ответ: 144° .

9. Параллельный пучок света распространяется горизонтально. Под каким углом (в градусах) к горизонту следует расположить плоское зеркало, чтобы отраженный пучок распространялся вертикально?

Ответ: 45° .

10. Под каким углом (в градусах) к горизонту следует расположить плоское зеркало, чтобы осветить дно вертикального колодца отраженными от зеркала солнечными лучами, падающими под углом 30° к горизонту?

Ответ: 60°

§ 39. Явление преломления света



Ключевые понятия:

- ✓ преломление света
- ✓ относительный и абсолютный показатели преломления
- ✓ полное внутреннее отражение света
- ✓ плоскопараллельная пластинка
- ✓ волоконная оптика

На этом уроке вы:

- научитесь выводить закон преломления света с помощью принципа Гюйгенса и применять его при решении задач; объяснять преимущества оптоволоконной технологии при передаче световых сигналов.



Преломление света. Как нам уже известно, *явлением преломления света* называется явление изменения направления распространения световых лучей на границе двух сред, когда лучи проходят из одной среды в другую. Оно наблюдается из-за того, что скорость распространения света в разных средах различна.

Закон преломления, открытый экспериментально, гласит:

1) луч падающий 1, луч преломленный 3 и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости (рис. 39.1);

2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и называется *относительным показателем преломления второй среды относительно первой*:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (39.1)$$

Докажем вторую часть закона. Для этого обратимся к рисунку 39.1. На этом рисунке 1 и 3 — это два падающих параллельных луча, а 1' и 3' — это два преломленных луча, которые тоже параллельны друг другу. В первой среде свет распространяется со скоростью v_1 , а во второй — со скоростью v_2 . Пусть в тот момент, когда луч 1 пришел в точку А, луч 3 находился в точке Е. Пока луч 1', двигаясь во второй среде, дойдет до точки D, луч 3, двигаясь в первой среде, доберется до точки В.

С учетом этого можно вычислить расстояния AD и EB: $AD = v_2 \tau$, а $EB = v_1 \tau$. Пусть α — это угол падения луча света, а β — угол преломления света. Тогда $\angle ABD = \beta$, а $\angle BAE = \alpha$ — углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Из прямоугольного треугольника ABE имеем, что

$$\frac{EB}{AB} = \sin \alpha. \quad (39.2)$$



Рис. 39.1

Из прямоугольного треугольника ABD получим:

$$\frac{AD}{AB} = \sin\beta. \quad (39.3)$$

Разделив равенство (39.2) на равенство (39.3), получим: $\frac{EB}{AD} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$.
А поскольку $AD = v_2\tau$, а $EB = v_1\tau$, то получим:

$$\frac{v_1\tau}{v_2\tau} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad \text{или} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}. \quad (39.4)$$

А так как скорости распространения света в средах неизменны, то будет оставаться постоянным и их отношение, т. е.

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2}, \quad \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1}. \quad (39.5)$$

Физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в первой среде больше скорости распространения света во второй среде, называется относительным показателем преломления. С учетом этого формула (39.4) переписется так:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{2,1}. \quad (39.6)$$

Это и есть *второй закон преломления света*. Анализируя формулу, мы выясним, что с ростом угла падения света будет увеличиваться и угол преломления.

Абсолютным показателем преломления данной среды называется физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в вакууме больше скорости распространения света в данной среде, т. е.

$$n = \frac{c}{v}. \quad (39.7)$$

Так как $c > v$, то $n > 1$. Так, например, для воды $n = 1,33$, для стекла $1,5 < n < 1,8$, для воздуха $n = 1,0003$, для алмаза $n = 2,45$. Среда с большим абсолютным показателем преломления называется *оптически более плотной средой*.

Опираясь на формулу (39.7) докажете, что относительный и абсолютный показатели преломления связаны соотношением: $n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$.

Тогда закон преломления света можно записать следующим образом: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$, или $n_1 \cdot \sin\alpha = n_2 \cdot \sin\beta$, т. е. *произведение абсолютного показателя преломления среды на синус угла падения светового луча остается постоянной величиной:*

$$n_1 \cdot \sin\alpha = n_2 \cdot \sin\beta. \quad (39.8)$$

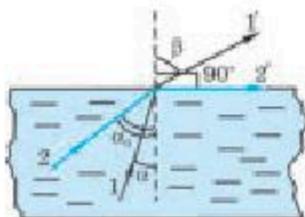


Рис. 39.2

Она называется *оптическим инвариантом*.

При переходе светового луча из одной среды в другую происходит отклонение светового луча от первоначального направления, причем отклонение будет тем больше, чем больше угол падения луча света.

Полное внутреннее отражение света. Рассмотрим переход света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду. В этом случае угол падения луча будет меньше угла преломления. Мы уже знаем, что *с ростом угла падения луча растет и угол преломления*. Тогда может наступить такой момент, что при некотором угле падения α_0 (рис. 39.2) угол преломления станет равным 90° , и луч света пойдет по границе раздела двух сред. А это означает, что во вторую среду свет не проходит. Такое явление называется *полным внутренним отражением*. При углах падения больших, чем α_0 , лучи света и подавно не выйдут из первой (более плотной) среды. Для случая полного внутреннего отражения закон преломления записывается следующим образом: $\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ или $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$. Для воздуха и вакуума $n_2 = 1$, и поэтому последняя формула при переходе света из какой-либо среды в воздух или вакуум будет выглядеть так: $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1}$. По этой формуле легко рассчитать величину абсолютного показателя преломления среды:

$$n_1 = \frac{1}{\sin \alpha_0}.$$

Для границы раздела стекло — воздух ($n_{\text{ст}} = 1,5$) критический угол равен $\alpha_0 = 42^\circ$, для границы вода — воздух ($n_{\text{воды}} = 1,33$) — $\alpha_0 = 48,7^\circ$. Явление полного внутреннего отражения находит применение во многих оптических устройствах. Его применяют в медицине, в эндоскопических аппаратах.

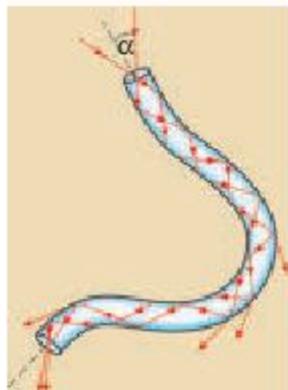


Рис. 39.3

Наиболее интересным и практически важным применением является создание волоконных световодов, которые представляют собой тонкие (от нескольких микрометров до миллиметров) произвольно изогнутые нити из оптически прозрачного материала (стекло, кварц). Свет, попадающий на торец световода, может распространяться по нему на большие расстояния за счет полного внутреннего отражения от боковых поверхностей (см. рис. 39.3). Научно-техническое направление, занимаю-

щается разработкой и применением оптических световодов, называется *волоконной оптикой*.

Преимущества волоконной оптики.

- Высокая скорость (от 10 Гбит/сек).
- Надежность (оптоволокну не портится от действия внешней среды, исключены помехи, к тому же она имеет слабое электромагнитное воздействие).
- Высокая пропускная способность, за счет чего большие объемы информации передаются за весьма короткое время (таким образом, в режиме онлайн можно смотреть фильмы, слушать музыку и многое др.).
- Расстояния, на которые можно передавать данные посредством оптоволокну могут быть большими.
- Безопасность информации (данные напрямую передаются с одной точки в другую, врезаться в кабель с оптоволокну практически невозможно, соответственно данные не передаются третьим лицам).
- Масса и форма кабеля небольшие.
- Стойкость к химическому влиянию и пожаробезопасность.

Плоскопараллельная пластинка. С практической точки зрения очень интересен случай, когда лучи света падают на плоскопараллельную пластинку, которая представляет собой прозрачное тело, ограниченное двумя параллельными поверхностями. При прохождении через такую пластинку световые лучи выходят смещенными от прежнего направления на некоторое расстояние, но остаются параллельными первоначальному направлению. Докажем это. Над и под пластинкой (рис. 39.4) находится одна и та же среда с абсолютным показателем преломления n_1 . У вещества пластинки абсолютный показатель преломления другой и равен n_2 . Тогда, согласно закону преломления света, для точки A (точка входа луча в пластинку) имеем: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$, а для точки B (точка выхода луча из пластинки): $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha_1} = \frac{n_1}{n_2}$.

Сравнив эти две формулы, мы получим, что $\alpha = \alpha_1$. А это означает, что луч света, пройдя плоскопараллельную пластинку, не меняет направление распространения, а просто смещается на некоторое расстояние. Найдем величину смещения луча $CB = x$. Из прямоугольного треугольника ABC имеем: $x = AB \sin \varphi$. Угол $\varphi = \alpha - \beta$. Из прямоугольного треугольника ABD получим, что $AB = \frac{H}{\cos \beta}$. Тогда *величина смещения луча* будет равна:

$$x = H \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}. \quad (39.9)$$

Из этой формулы видно, что: *чем толще пластинка, тем больше смещение луча; чем больше угол падения, тем больше смещение луча.*

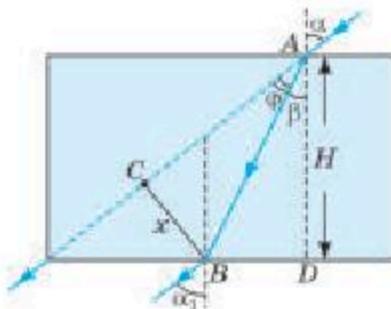


Рис. 39.4

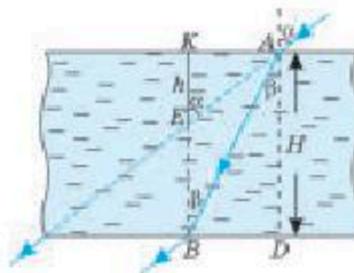


Рис. 39.5

Истинная и кажущаяся глубина. Вы, наверное, обращали внимание, что если смотреть в аквариум или озеро, то их дно всегда кажется ближе, чем на самом деле.

Подумайте, как это объяснить.

А мы рассчитаем истинную глубину водоема.

Будем рассматривать малые углы падения лучей света на поверхность водоема. Обратимся к рисунку 39.5, на котором изображен падающий под малым углом α луч света. Выразим кажущуюся глубину водоема KE из прямоугольного треугольника AKE : $KA = h \cdot \operatorname{tg}\alpha$. Из прямоугольного треугольника ADB выразим сторону BD : $BD = H \cdot \operatorname{tg}\beta$. Так как $BD = AK$, то $h \cdot \operatorname{tg}\alpha = H \cdot \operatorname{tg}\beta$. Отсюда истинная глубина водоема равна:

$$H = h \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}. \quad (39.10)$$

Призма. Явление отражения и преломления света применяется во многих оптических приборах. Одним из таких приборов является призма.

Призма — это прозрачное тело, ограниченное двумя пересекающимися плоскостями. Угол, образованный пересекающимися плоскостями, называется преломляющим углом призмы, а пересекающиеся плоскости — преломляющими гранями. Линии пересечения плоскостей называются преломляющими ребрами. Плоскость призмы, расположенная напротив преломляющего угла, называется основанием призмы.

Рассмотрим ход лучей в призме. Обратимся к рисунку 39.6, на котором изображен ход лучей в призме в соответствии с законами отражения и преломления света.

Пусть на преломляющую грань призмы KO падает луч света под углом α_1 . После преломления в призме луч, изменив направление своего распространения, пойдет под β_1 . Пусть направление распространения луча света (прямая AB) после преломления будет параллельно основанию призмы KL . Восстановив перпендикуляр ко второй пре-

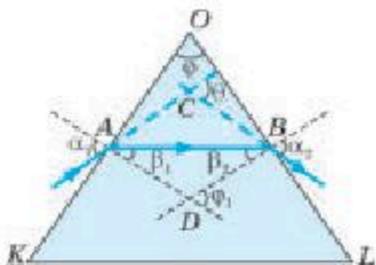


Рис. 39.6

ломляющей грани, мы получим, что на нее луч света будет падать под углом β_2 , а выйдет из призмы под углом α_2 , который будет являться углом преломления луча света AB . Точка C — это точка пересечения продолжений падающего и преломленного лучей, а точка D — это точка пересечения нормалей к преломляющим ребрам призмы. Угол φ — это *преломляющий угол призмы*. Найдем угол θ — это угол отклонения луча света от первоначального направления. Под *углом отклонения призмы* понимают угол, составленный направлениями вошедшего и вышедшего лучей. Для треугольника ABC угол θ является внешним углом, а внешний угол равен сумме внутренних углов, не смежных с ним. Следовательно, $\theta = \angle CAB + \angle CBA = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2)$, или $\theta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2)$. Для треугольника ABD угол φ_1 — тоже внешний, т. е. $\varphi_1 = \beta_1 + \beta_2$, но $\varphi_1 = \varphi$ как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Тогда получим:

$$\theta = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi.$$

Проведя ряд несложных расчетов с использованием тригонометрических преобразований и законов преломления света, можно доказать, что угол отклонения призмы будет минимальным при следующих условиях: $\alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta_1 = \beta_2$. Если продолжить расчеты, то можно получить *формулу тонкой призмы*:

$$\theta_{\min} = (n - 1) \varphi.$$

Условие максимального отклонения лучей после преломления в призме таково:

$$\theta_{\max} = \alpha_1 + \frac{\pi}{2} - \varphi.$$

При этом вышедший луч будет скользить по преломляющей грани.



1. Какое явление называется преломлением света? Почему оно наблюдается?
2. Сформулируйте и выведите законы преломления света.
3. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления? Как они связаны между собой?
4. Какое явление называется полным внутренним отражением света? Когда оно наблюдается?
5. Какие явления мы наблюдаем при прохождении света через плоскопараллельную пластинку?
6. Что такое истинная и кажущаяся глубина водоема? Почему они не равны?
7. Дайте определение основных характеристик призмы.
8. Как определить ход лучей в призме?

Примеры решения задач

1. Под каким углом должен упасть луч света на поверхность стекла, чтобы угол преломления оказался в два раза меньше угла падения? Показатель преломления стекла 1,5.

<p><i>Дано:</i></p> $\beta = \frac{\alpha}{2}$ $n = 1,5$ <hr style="width: 100%;"/> $\alpha = ?$	<p><i>Решение.</i> Воспользуемся законом преломления:</p> $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (39.11).$ <p>Так как $\beta = \frac{\alpha}{2}$, то $\alpha = 2\beta$, и тогда выражение (39.11) переписывается так:</p> $\frac{\sin 2\beta}{\sin \beta} = n.$
--	---

Из тригонометрии нам известно, что $\sin 2\beta = 2\sin \beta \cdot \cos \beta$. С учетом этого получим: $\frac{2\sin \beta \cdot \cos \beta}{\sin \beta} = n$ или $\cos \beta = \frac{n}{2}$. Мы знаем, что $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1$, т. е. $\sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta} = \sqrt{1 - \frac{n^2}{4}} = \frac{\sqrt{4 - n^2}}{2}$. Подставив это значение синуса угла преломления в (39.11), получим: $\frac{2 \sin \alpha}{\sqrt{4 - n^2}} = n$.

Отсюда находим угол падения луча света: $\sin \alpha = \frac{n\sqrt{4 - n^2}}{2}$. Подставив численные значения, получим: $\sin \alpha = \frac{1,5\sqrt{4 - 2,25}}{2} = 0,992$. По таблице Брадиса находим, что $\alpha = 83^\circ$.

$$(\alpha = 83^\circ)$$

2. На поверхности водоема глубиной $H = 2$ м плавает деревянный диск радиусом $r = 3$ м, который освещается рассеянным светом. Определите радиус тени и полутени от диска на дне водоема.

<p><i>Дано:</i></p> $H = 2 \text{ м}$ $r = 3 \text{ м}$ $n = 1,3$ <hr style="width: 100%;"/> $R_1 = ?$ $R_2 = ?$	<p><i>Решение.</i> Так как на диск падает рассеянный свет, то угол падения света произвольный — от 0° до 90°. Область полной тени будет наблюдаться на дне при угле падения света, равном 90°. А максимальный радиус полутени R_2 тоже будет наблюдаться при угле падения 90° (рис. 39.7). Из закона преломления света для данного случая получим: $\frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta} = n$.</p>
--	--

Отсюда $\sin \beta = \left(\frac{1}{n}\right)$. Из рисунка 39.7 видно, что $R_1 = r - x$, а $R_2 = r + x$ и $x = H \cdot \operatorname{tg} \beta$. Тогда $R_1 = r - H \cdot \operatorname{tg} \beta$ и $R_2 = r + H \cdot \operatorname{tg} \beta$. Так как

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}},$$

то с учетом уравнения (39.11)

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1 \cdot n}{n \sqrt{n^2 - 1}} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

Тогда радиусы тени и полутени от диска на дне водоема будут равны:

$$R_1 = r - \frac{H}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad \text{и} \quad R_2 = r + \frac{H}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

Произведем вычисления и получим: $R_1 = 0,6$ м

и $R_2 = 5,4$ м.

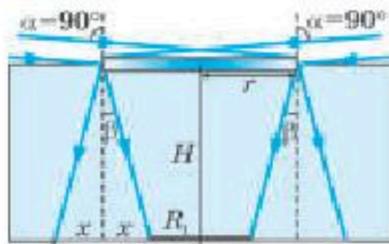


Рис. 39.7

$$(R_1 = 0,6 \text{ м}; R_2 = 5,4 \text{ м})$$



Упражнение 18

1. Абсолютные показатели алмаза и стекла соответственно равны 2,42 и 0,5. Каково отношение толщины этих веществ, если время распространения света в них одинаково?

Ответ: 0,62.

2. При переходе солнечных лучей из воздуха в стекло угол падения 60° , а угол преломления 30° . Найдите скорость распространения света в стекле и предельный угол полного внутреннего отражения.

Ответ: $1,73 \cdot 10^8$ м/с; 35° .

3. Палка с изломом посередине погружена в пруд так, что наблюдателю, находящемуся на берегу и смотрящему вдоль надводной части палки, она кажется прямой, составляющей угол 30° с горизонтом. Какой угол излома имеет палка? Показатель преломления воды.

Ответ: 20° .

4. В кювете с жидкостью на глубине расположен источник света. На дне кюветы находится плоское зеркало. Слой жидкости в кювете 6 см. На поверхности жидкости над источником света плавает черный диск площадью 314 см^2 . На какой глубине должен быть расположен источник света, чтобы он был виден внешнему наблюдателю, если показатель преломления жидкости 1,14?

Ответ: 0,5 см.

5. Определите боковое смещение луча после прохождения через плоскопараллельную пластинку толщиной 6 см, угол падения луча света 40° , показатель преломления материала пластинки 1,6.

Ответ: 1,8 см.

6. На дне стакана, заполненного водой на 10 см, лежит монета. На каком расстоянии от поверхности воды наблюдатель видит монету? Показатель преломления воды.

Ответ: 7,5 см.

7. Наблюдатель рассматривает горошину через толстое стекло, нижняя грань которого расположена на расстоянии 5 см от горошины. Толщина стекла 3 см, показатель преломления 1,5. Определите, на каком расстоянии от нижней грани стекла находится видимое изображение горошины.

Ответ: 4 см.

§ 40. Линзы. Формула тонкой линзы



Ключевые понятия:

- ✓ линзы собирающие и рассеивающие
- ✓ оптический центр линзы
- ✓ фокус линзы
- ✓ оптическая сила линзы
- ✓ главная и побочная ось линзы
- ✓ увеличение линзы

На этом уроке вы:

- научитесь строить изображение в линзах с помощью трех замечательных лучей, применять формулу тонкой линзы при решении задач.



Во многих оптических приборах: телескопах, микроскопах, фотоаппаратах, проекционной аппаратуре, биноклях, очках, применяют *линзы* — прозрачные тела, ограниченные двумя сферическими поверхностями. Линзы делятся на *собирающие* и *рассеивающие*. Первые собирают проходящий сквозь них свет в одну точку, а вторые рассеивают его. У собирающих линз середина толще, чем края, а у рассеивающих, наоборот, середина тоньше краев.

Основные понятия и характеристики линзы. Рассмотрим линзу, изображенную на рисунке 40.1. Здесь точки O_1 и O_2 — центры кривизны сферических поверхностей, образовавших линзу; R_1 и R_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей. *Прямая, проходящая через центры кривизны сферических поверхностей, образовавших линзу, называется главной оптической осью линзы.* Точка O , расположенная внутри линзы на главной оптической оси линзы, в которой лучи не преломляются, называется *оптическим центром линзы*. Прямая линия KL , проходящая через оптический центр, но не через центры кривизны, называется *побочной осью*. Точки A и B пересечения главной оптической оси с поверхностями линз называются *вершинами линзы*. Расстояние AB между вершинами линзы называется *толщиной линзы*. Если толщина линзы соизмерима с радиусом кривизны сферических

поверхностей, образовавших линзу, то линза называется *толстой*, если же она намного меньше его, то линза называется *тонкой*.

По форме поверхностей, образующих линзу, линзы делятся на *выпуклые* (плосковыпуклые, двояковыпуклые и вогнуто-выпуклые) и на *вогнутые* (плосковогнутые, двояковогнутые и выпукло-вогнутые).

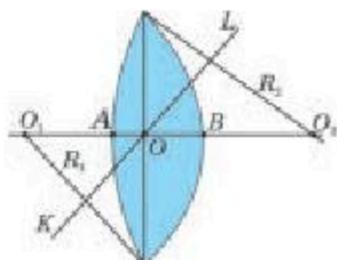


Рис. 40.1

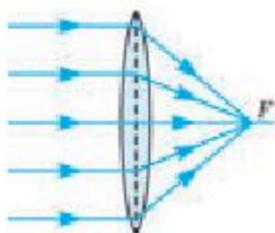


Рис. 40.2

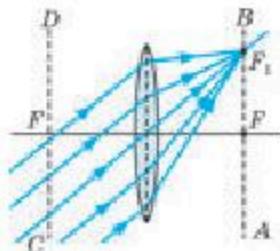


Рис. 40.3

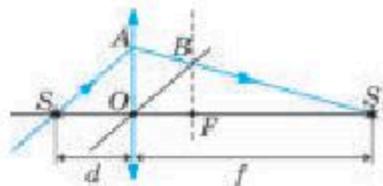


Рис. 40.4

Если направить на собирающую линзу пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то они соберутся в одной точке — главном фокусе F линзы (рис. 40.2). Эта точка находится на главной оптической оси линзы. У линзы два главных фокуса, расположенных по обе стороны линзы. Если же на линзу направить пучок лучей, идущих параллельно побочной оси (рис. 40.3), то они тоже соберутся в одной точке — побочном фокусе F_1 , который расположен в фокальной плоскости AB линзы. **Фокальной плоскостью линзы называется плоскость, проведенная через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси линзы.** Понятно, что фокальных плоскостей у линзы две (AB и CD), а побочных фокусов — бесконечное число.

На практике в основном используются тонкие линзы. Для удобства были введены следующие обозначения: значком \uparrow обозначается собирающая линза, а значком \downarrow — рассеивающая линза.

Формула тонкой линзы. Выведем формулу тонкой линзы. Для этого обратимся к рисунку 40.4. Здесь S — светящаяся точка; S_1 — изображение светящейся точки; SA — падающий луч; AS_1 — луч, прошедший через линзу, F — главный фокус линзы; BF — фокальная плоскость линзы; точка O — оптический центр линзы; OB — побочная ось линзы (она параллельна падающему лучу SA); точка B — побочный фокус линзы. Обозначим расстояние от предмета (светящейся точки) до оптического центра линзы SO буквой d , расстояние от оптического центра линзы до изображения предмета OS_1 буквой f , фокусное расстояние линзы OF буквой F и произведем следующие расчеты. Треугольники SAS_1 и OBS_1 подобны по третьему признаку подобия треугольников. В подобных треугольниках соответствующие стороны и отрезки сторон пропорциональны, следовательно, $\frac{SS_1}{OS_1} = \frac{SO}{OF}$ или с учетом введенных обозначений $\frac{d+f}{f} = \frac{d}{F}$. Преобразуем эту формулу: $\frac{d}{f} + 1 = \frac{d}{F}$. Теперь, разделив левую и правую части формулы на d , получим:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (40.1)$$

Эта формула называется *формулой тонкой линзы*. Кстати, вывести формулу тонкой линзы можно и другим способом.

Предложите свои способы.

Рассмотрим особенности применения формулы. В зависимости от того, какое изображение дает линза (мнимое или действительное), и от того, какая это линза, мы можем получить следующие формы записи этой формулы.

1. *Линза собирающая дает действительное изображение.* Тогда $d > 0$ (положительно), $f > 0$ (положительно) и $F > 0$ (положительно). Формула тонкой линзы в этом случае будет выглядеть так:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

2. *Линза собирающая, но дает мнимое изображение.* Тогда $d > 0$ (положительно), $f < 0$ (отрицательно) и $F > 0$ (положительно). Формула тонкой линзы в этом случае будет выглядеть так: $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$.

3. *Линза рассеивающая.* Она всегда дает мнимое изображение. Тогда $d > 0$ (положительно), $f > 0$ (положительно) и $F < 0$ (отрицательно). Формула тонкой линзы в этом случае будет выглядеть так:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

Оптическая сила линзы. Для того чтобы показать, как сильно “ломает” лучи линза, ввели особую физическую величину — *оптическую силу линзы D*. Под *оптической силой линзы* понимают величину, обратную главному заднему расстоянию или величину, обратную фокусному расстоянию линзы. Следовательно, *физический смысл оптической силы линзы состоит в том, что она характеризует степень преломления световых лучей после прохождения через линзу:*

$$D = \frac{1}{F}, \quad (40.2)$$

или

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Оптическая сила линзы измеряется в *диоптриях*: $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

Построение изображения в линзах. Для построения изображения в линзах пользуются тремя замечательными лучами (рис. 40.5):

1. Луч, идущий параллельно главной оптической оси, после преломления проходит через фокус линзы.

2. Луч, идущий через оптический центр линзы, не испытывает преломления.

3. Луч, идущий через главный фокус линзы, после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси.

Собирающая линза может давать и действительное, и мнимое изображения предмета. Напоминаем, что *действительное изображение получается только тогда, когда пересекаются сами лучи, а мнимое — когда пересекаются не сами лучи, а их продолжения.*

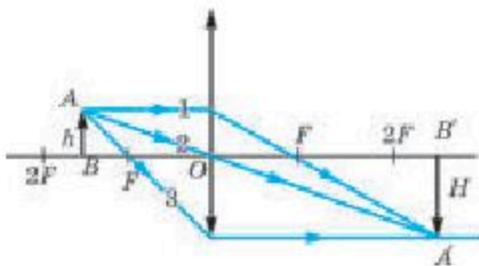


Рис. 40.5

Увеличение линзы. Линза может давать увеличенное и уменьшенное изображения предмета. Под *линейным увеличением линзы* понимают физическую величину, определяемую отношением линейного размера изображения к линейному размеру предмета:

$$\Gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{H}{h}. \quad (40.3)$$

По рисунку 40.5 можно доказать, что

$$\Gamma = \frac{f}{d}. \quad (40.4)$$

Если построить изображение предмета в рассеивающей линзе, то можно увидеть, что она всегда дает уменьшенное мнимое, не перевернутое изображение. А собирающая линза в зависимости от того, где находится предмет, может давать и действительное, и мнимое изображения, увеличенное и уменьшенное изображения.

Недостатки изображений в линзах. В реальной жизни мы чаще всего: а) пользуемся толстыми линзами, а расчеты сделаны для тонких линз; б) рассматриваем малые диаметры линз, а на самом деле их диаметры достигают нескольких метров; в) рассматриваем параксиальные лучи света, а на самом деле не все лучи, падающие на линзу, такие. Поэтому реальные линзы дают размытые изображения. Основными дефектами линз являются:

1) **Сферическая aberrация** (от лат. *aberratio* — “уклонение”), которая представляет собой возникновение у линзы нескольких фокусов вместо одного при использовании широких параллельных световых пучков. Бороться со сферической aberrацией можно, используя специальные линзы или системы линз и применяя диафрагмирование.

2) **Хроматическая aberrация**, которая состоит в том, что линзы, фокусируя свет в пятно, окрашивают его. Происходит это из-за того, что преломление света с разными длинами волн происходит по-разному (чем больше длина волны, тем меньше ее преломление). Исправляют хроматическую aberrацию применением специальных систем линз (ахроматоров и анахроматоров).

3) **Астигматизм** — это дефект, зависящий от продольных и поперечных размеров линзы, т. е. от формы кривизны линзы. Астигматизма можно избежать, если применять круглые линзы.

4) **Дисторсия** (лат. *distorsio* — “искривление”) — это искажение изображения, вызванное неодинаковостью поперечного увеличения линзы в пределах поля зрения. При этом происходит нарушение геометрического подобия между предметом и его изображением. Например, изображения квадрата, даваемые линзой, могут быть подушкообразными и бочкообразными. Дисторсию особенно стараются избежать в фотографических объективах, применяемых в геодезии, аэро съемке.



1. Что вы понимаете под линзой? Какие виды линз вы знаете?
2. Чем отличается рассеивающая линза от собирающей?
3. Что называется оптическим центром линзы? Что такое фокус линзы? Какая ось называется главной оптической осью линзы, а какая — побочной оптической осью?
4. Как опытным путем определить положение фокуса у собирающей линзы; рассеивающей?
5. Какой фокус у собирающей линзы, а какой — у рассеивающей?
6. Какая плоскость называется фокальной плоскостью?
7. Как с помощью побочного фокуса определить нахождение главного фокуса линзы?
8. Какое изображение называется действительным, а какое — мнимым?
9. Выведите формулу тонкой линзы и проанализируйте ее. Попробуйте применить ее самостоятельно для нескольких случаев расположения предмета и линзы: а) $d > 2F$; б) $d = 2F$; в) $d = F$; г) $d < F$. Рассмотрите рассеивающую и собирающую линзы.
10. Постройте изображение предмета, находящегося: а) на двойном фокусе линзы; б) между линзой и ее главным фокусом. Дайте характеристику получившихся изображений.
11. Как среда, окружающая линзу, влияет на ход лучей в ней?
12. Может ли одна и та же линза быть собирающей и рассеивающей? Если да, то приведите обоснование и примеры. Если нет, то поясните, почему.
13. Что называют оптической силой линзы?
14. Что называют линейным увеличением линзы? Что означает фраза: “Увеличение линзы равно 0,25”?
15. Получится ли полное изображение предмета в линзе, если половину линзы закрыть непрозрачной ширмой?
16. Как надо расположить две собирающие линзы, чтобы пучок параллельных лучей, пройдя через обе линзы, остался пучком параллельных лучей? Изобразите это на рисунке.

Примеры решения задач

1. На рисунке 40.6, а дан ход луча SA после его преломления в рассеивающей линзе. Найдите построением положение главных фокусов линзы. Покажите дальнейший ход луча CD.

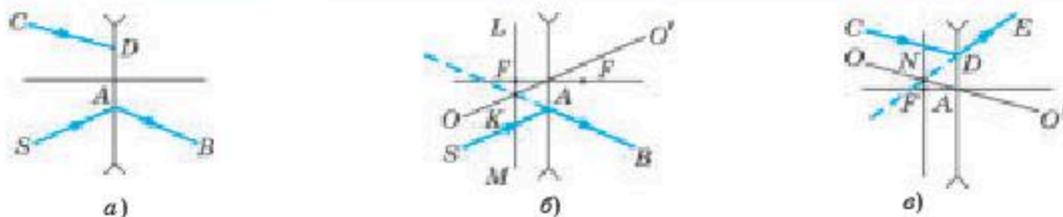


Рис. 40.6

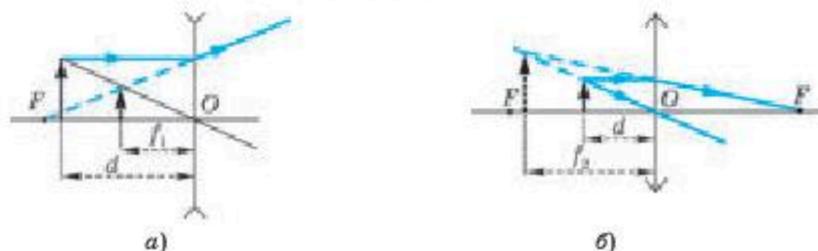


Рис. 40.7

Решение. Проведем побочную ось OO' (рис. 40.6, б), параллельную лучу SA . Эта ось пересекается с продолжением преломленного луча AB в точке K , лежащей в фокальной плоскости LM . Главным фокусом рассеивающей линзы будет точка пересечения фокальной плоскости с главной оптической осью линзы.

Для того чтобы найти дальнейший ход луча CD , проведем прямую OO' (рис. 40.6, в), проходящую через оптический центр линзы параллельно лучу CD . Точка пересечения этой прямой, которая является побочной осью линзы, с фокальной плоскостью LM будет побочным фокусом линзы N . Проведя прямую через точки N и D , получим дальнейший ход луча CD после преломления в линзе. Это будет прямая DE .

2. Тонкая линза с некоторым фокусным расстоянием F_1 создает прямое изображение предмета с увеличением $\Gamma_1 = \frac{2}{3}$. Каким будет увеличение линзы, если, не меняя расстояния между предметом и линзой, заменить эту линзу собирающей с такой же по модулю оптической силой? (рис. 40.7)

Дано:

$$\Gamma_1 = \frac{2}{3}$$

$\Gamma_2 = ?$

Решение. Сначала мы имели дело с рассеивающей линзой, так как только с ее помощью можно получить прямое (неперевернутое) уменьшенное изображение предмета. Для рассеивающей линзы формула тонкой линзы имеет вид:

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_1}. \tag{40.5}$$

Так как линза рассеивающая, то перед фокусным расстоянием F линзы ставится знак “-”. Если изображение мнимое, то расстояние от

изображения до линзы тоже берется со знаком “-”. Из этого следует, если увеличение линзы больше 0,5, то предмет находится между линзой и ее оптическим центром.

После замены рассеивающей линзы на собирающую мы получим изображение предмета на расстоянии f_2 (рис. 40.6, б), и поэтому изменится увеличение линзы. Для этого случая формула тонкой линзы запишется так:

$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2} \quad (40.6)$$

Знак “-” перед f_2 стоит потому, что изображение собирающая линза в этом случае ($d < F$) дает мнимое, увеличенное и прямое.

Увеличение линзы находим по формулам: $\Gamma_1 = \frac{f_1}{d}$ в первом случае и $\Gamma_2 = \frac{f_2}{d}$ во втором. Отсюда следует, что $f_1 = \Gamma_1 d$ (40.7)

и $f_2 = \Gamma_2 d$ (40.8). По условию задачи $d_2 = -d_1$, т. е. $\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{F_1} - \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2}$.

Следовательно, равны и правые части в формулах (40.5) и (40.6):

$$-\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2}.$$

Отсюда получим, что

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{2}{d}. \quad (40.9)$$

Подставив в равенство (40.9) формулы (40.7) и (40.8), получим:

$$\frac{1}{\Gamma_1 d} + \frac{1}{\Gamma_2 d} = \frac{2}{d} \text{ или } \Gamma_2 = \frac{\Gamma_1}{2\Gamma_1 - 1} = 2.$$

Ситуации, описанные в задаче, можно изобразить графически (см. рис. 40.7, а, б), используя для построения три замечательных луча.

$$(\Gamma_2 = 2)$$



Упражнение 19

1. Взяли два стекла от часов и склеили выпуклую линзу. Как будет действовать эта линза на пучок света в воде? Ответ поясните с помощью рисунка.

Ответ: рассеивает.

2. Когда с помощью собирающей линзы получают мнимое изображение предмета? Ответ поясните построением хода световых лучей в линзе.

Ответ: зависит от окружающей среды.

3. В каком случае высота изображения, полученного с помощью собирающей линзы, равна высоте предмета? Ответ поясните построением хода световых лучей в линзе.

Ответ: когда тело находится на расстоянии $2F$ от линзы.

4. Даны главная оптическая ось линзы MN , предмет AB и его изображение A_1B_1 (рис. 40.8). Определите центр линзы и ее фокусное расстояние.



Рис. 40.8

5. Даны главная оптическая ось линзы и ход одного из лучей (рис. 40.9). Определите положение фокуса линзы.

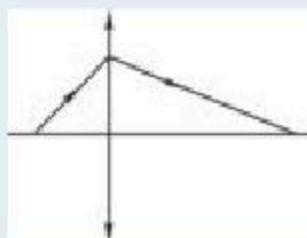


Рис. 40.9

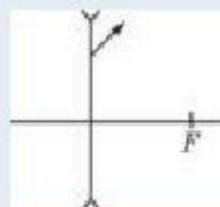
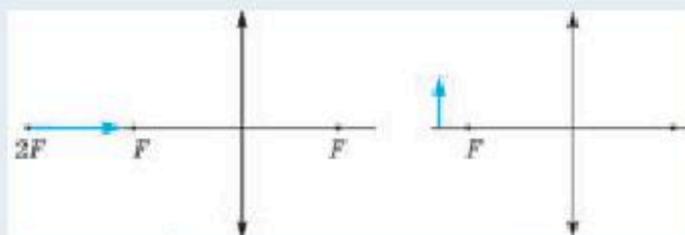


Рис. 40.10

6. На рисунке 40.10 дан луч, прошедший сквозь линзу с фокусным расстоянием F . Постройте ход луча до линзы.
 7. Постройте изображение данного предмета (рис. 40.11, а, б) в линзе. Какое это изображение?

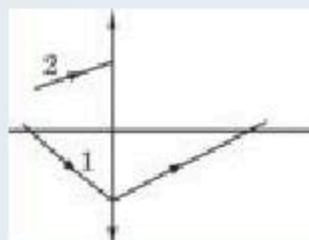


а)

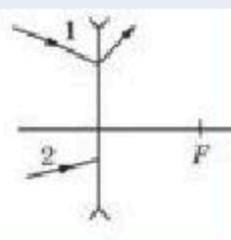
Рис. 40.11

б)

8. На рисунке 40.12, а, б дан ход луча 1 в линзах. Найдите построением ход луча 2.



а)



б)

Рис. 40.12

9. На экране с помощью тонкой линзы получено изображение предмета с увеличением 2. Предмет передвинули на 1 см. Для того чтобы получить четкое изображение, пришлось передвинуть экран. При этом увеличение оказалось равным 4. На какое расстояние передвинули экран?

Ответ: 8 см.

10. Предмет поместили на главной оптической оси собирающей линзы на расстоянии 20 см от нее и получили его действительное изображение на расстоянии $4F$, где F — фокусное расстояние линзы. Найдите оптическую силу линзы.

Ответ: 6,67 дптр.

11. Предмет поместили на главной оптической оси собирающей линзы на расстоянии $1,5F$ от нее. Изображение при этом получается на расстоянии 21 см от линзы. Определите фокусное расстояние линзы.

Ответ: 7 см.

12. Расстояние между точечным источником и экраном 3 м. Линза, помещенная между ними, дает четкое изображение предмета при двух его положениях, расстояние между которыми равно 1 м. Найдите фокусное расстояние линзы.

Ответ: 0,67 м

13. Предмет, расположенный в 125 см от собирающей линзы перпендикулярно ее главной оптической оси, дает на экране изображение высотой 25 мм. Найдите высоту предмета, если фокусное расстояние линзы равно 0,25 м.

Ответ: 10 см

14. Расстояние от предмета до изображения в 5 раз больше, чем расстояние от предмета до линзы. Какая это линза? Определите ее увеличение. Рассмотрите все возможные варианты решения. (а) собирающая; б) рассеивающая).

Ответ: а) $\Gamma = 4$, если изображение действительное;
б) $\Gamma = 6$, если изображение мнимое.

15. Расстояния от предмета до линзы и от линзы до изображения одинаковы и равны 0,5 м. Во сколько раз увеличится изображение, если предмет сместить на расстояние 20 см по направлению к линзе? Определите фокусное расстояние линзы.

Ответ: $\Gamma = 1,25$; $F = 25$ см.

16. Дальнозоркий человек видит отчетливо предметы, расположенные не ближе 1 м от него. В каких очках он нуждается, чтобы читать газету, держа ее на расстоянии 25 см от глаз?

Ответ: собирающая с $D = 3$ дптр.

§ 41. Оптические приборы



Ключевые понятия:

- ✓ проекционные приборы
- ✓ фотоаппарат
- ✓ глаз
- ✓ очки
- ✓ лупа
- ✓ микроскоп
- ✓ телескоп

На этом уроке вы:

- научитесь строить ход лучей в системе линз, строить и объяснять ход лучей в лупе, микроскопе, телескопе.



Законы геометрической оптики лежат в основе действия разнообразных оптических приборов, основной частью которых является некоторая оптическая система, которая формирует изображение предмета. В зависимости от назначения различают следующие оптические приборы: проекционная аппаратура, микроскопы, телескопы, фотоаппараты и др.

Проекционные оптические приборы. К проекционным приборам относятся оптические приборы, дающие на экране действительное, увеличенное изображение предмета. Различают три вида этих приборов: *диаскоп* (от лат. *диа* — “прозрачный”), *служащий для проектирования прозрачных предметов на экран*; *эпископ*, *проектирующий на экран непрозрачные предметы*, и *эпидиаскоп*, *проектирующий и прозрачные, и непрозрачные предметы*. Во всех случаях предмет помещают между фокусом и двойным фокусом объектива. Чем ближе предмет к фокусу, тем большее увеличение дает проекционный аппарат. В диаскопе имеется мощный источник света, световой поток от которого направляется с помощью *конденсора* (системы линз) на *диапозитив* (прозрачный объект). Для увеличения светового потока иногда за источником света устанавливают вогнутое зеркало, которое отражает свет и направляет его обратно в систему линз. Конденсор устанавливают так, чтобы он давал изображение небольшого источника света на объектив, который в свою очередь проектирует диапозитив на экран.

Для демонстрации непрозрачных предметов, например, рисунков в книге, их сильно освещают с помощью лучей, идущих от лампы, помещенной в фокус вогнутого зеркала. Далее световой поток, отражаясь от рисунка, попадает на плоское зеркало, а от него с помощью светосильного объектива на экран. Такой прибор называется *эпископом*.

Фотоаппарат. *Фотоаппарат* — это оптическое устройство с линзовой системой, с помощью которой получают изображение предмета на светочувствительной пленке, сохраняющей изображение. Основные части фотоаппарата: объектив, непрозрачная камера, фотопленка

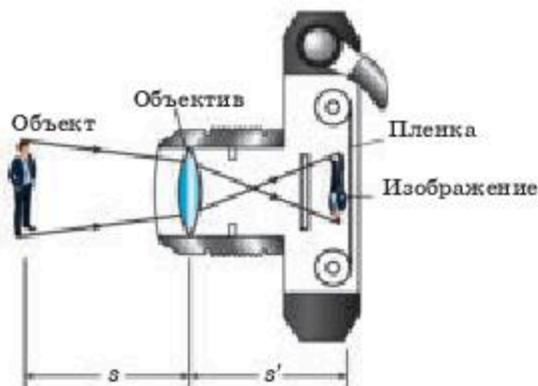


Рис. 41.1

(рис. 41.1). *Объектив* представляет собой сложную систему линз, предназначенную для проектирования изображения на фотопленку. С помощью объектива исправляют такие оптические дефекты, как сферическую и хроматическую аберрации, астигматизм и др., присущие линзам. На плоскости фотопленки получается действительное, уменьшенное, перевернутое изображение предмета. Под действием световой энергии на фотопленке происходит разложение бромистого серебра и образуется негатив.

Сам предмет при фотографировании помещают за двойным фокусом, а его изображение получается между фокусом и двойным фокусом. Так как расстояние от предмета до объектива может быть различным, то для получения резкого изображения необходимо изменять и расстояние между объективом и фотопленкой. Это делают, перемещая сам объектив. От величины световой энергии, попадающей на фотопленку, зависит качество снимка. Поэтому в фотоаппарате есть *специальный затвор, пропускающий свет лишь определенное время — время экспозиции*, которое зависит от качества пленки и от ее освещенности. Освещенность фотопленки зависит от светосилы объектива. *Светосила объектива — это величина, определяемая квадратом отношения диаметра объектива к его фокусному расстоянию.*

Диаметр действующей части объектива можно изменять с помощью диафрагмы. Уменьшая отверстие диафрагмы, можно добиться того, что изображения точек, находящихся на разных расстояниях от фотоаппарата, будут одинаково четкими. Возрастает, как говорят, глубина резкости.

Значение фотографии трудно переоценить. Современная фотография стала быстрой, цветной, стереоскопической. Она широко применяется во многих областях жизни: с ее помощью получают информацию и о космических объектах, и о микрочастицах, она фиксирует невидимые излучения. Нас радует художественная фотография. Фотокорреспонденты дают более полный отчет о событиях, происходящих вокруг нас.

Глаз. Глаз представляет собой “живой” оптический прибор, позволяющий воспринимать окружающий мир как человеку, так и животным. Глаз дает уменьшенное, действительное, перевернутое изображение предмета на сетчатке глазного яблока.

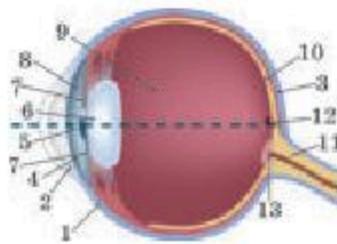


Рис. 41.2

Структура глаза изображена на рисунке 41.2.

1. *Склера* — внешняя оболочка глазного яблока.
2. *Роговица* — передняя прозрачная часть склеры (ее показатель преломления $n = 1,38$).
3. *Сосудистая оболочка*, состоящая из кровеносных сосудов, питающих глаз. Она прилегает к склере с внутренней стороны.
4. *Радужная оболочка* — передняя часть сосудистой оболочки. У разных людей цвет радужной оболочки разный.
5. *Зрачок* — отверстие в середине радужной оболочки, сквозь которое проходит свет. Диаметр зрачка рефлекторно изменяется от 2 до 8 мм в зависимости от освещенности.
6. *Хрусталик* — прозрачное, упругое, слоистое тело, похожее на двояковыпуклую линзу, проектирующую изображение на сетчатку глазного яблока. Это становится возможным, так как кривизна хрусталика может изменяться под воздействием мышц, облегающих его со всех сторон, что приводит к тому, что изображения предметов, лежащих на различных расстояниях, проектируются точно на поверхность чувствительного слоя сетчатки. Этот процесс называется *аккомодацией*. Расстояние от предмета до глаза, при котором удобнее всего рассматривать детали предмета, называется *расстоянием наилучшего зрения*. Для нормального глаза это расстояние 25 см.
7. *Мышцы*, которые могут деформировать хрусталик, что приводит к изменению его радиуса кривизны. Кроме того, эти мышцы поворачивают глаз так, чтобы его ось была направлена на рассматриваемый предмет. Напряжения мышц правого и левого глаза различаются тем сильнее, чем ближе предмет. Изображения близкого предмета на сетчатках правого и левого глаза несколько отличаются друг от друга. Это дает человеку возможность оценивать расстояние до предмета или его частей, а также создает впечатление объемности наблюдаемых тел.
8. *Водянистая жидкость*.
9. *Стекловидное тело*, заполняющее полость глазного яблока, представляет собой студенистую жидкость.
10. *Сетчатка* покрывает все дно глазного яблока. Она состоит из разветвлений зрительного нерва.
11. *Зрительный нерв*, нервные окончания которого называются *колбочка* и *палочка*. Они представляют собой светочувствительные элементы.
12. *Желтое пятно* — место на сетчатке, наиболее чувствительное к свету.

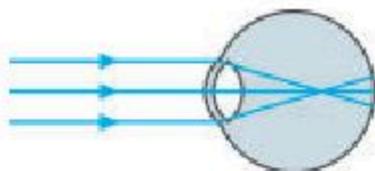
13. *Слепое пятно* — место на сетчатке, куда входит зрительный нерв.

Глаз можно рассматривать как оптическую систему с переменным фокусным расстоянием и неизменным расстоянием до экрана (сетчатки). Свет проецируется на сетчатку, нервные окончания которой (палочки и колбочки) посылают импульс в центр зрения головного мозга. Этот процесс приводит к образованию зрительных образов. Глаз устроен так, что уничтожает хроматическую и сферическую аберрации. Первая уничтожается потому, что заднее фокусное расстояние хрусталика не равно переднему, а вторая из-за того, что строение глаза неоднородно (показатель преломления в центре глаза 1,41, а по его краям 1,38).

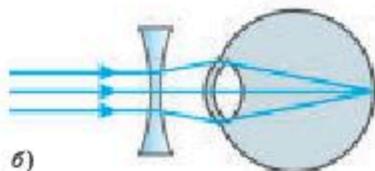
По своему устройству глаз сходен с фотоаппаратом. Роль объектива выполняет хрусталик совместно со стекловидным телом. Изображение получается на чувствительной поверхности сетчатки. Получение четкого изображения осуществляется путем аккомодации. Зрачок играет роль изменяющейся по размерам диафрагмы.

Очки. Глаз человека с нормальным зрением (расстояние наилучшего видения равно 25 см) проецирует изображение предмета на сетчатку. У некоторых же людей глаза в ненапряженном состоянии проецируют изображение не на сетчатку, а перед ней (рис. 41.3, а). Такие люди обладают дефектом зрения, называемым *близорукостью*. Близорукий человек отчетливо видит предметы, начиная с определенного расстояния. Он хорошо различает близкие предметы, но плохо — удаленные от него. Для исправления этого дефекта применяют очки с рассеивающими линзами или, как говорят, минусовыми (рис. 41.3, б).

Если же глаз дает изображение предмета за сетчаткой (рис. 41.4), то дефект называется *дальнозоркостью*. Люди с этим дефектом хотя и видят далекие предметы, но не отчетливо, слабо различая их подробности. Близкие же предметы дальнорукые люди видят плохо, расплывчато. У них ближний предел аккомодации наблюдается при расстояниях до предмета, больших 25 см. Дальнорукость исправляют ношением очков с собирающими линзами (рис. 41.4, а, б).

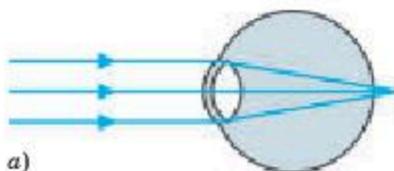


а)

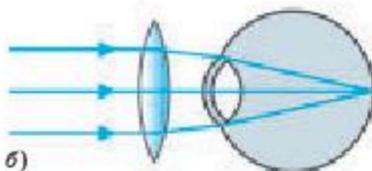


б)

Рис. 41.3



а)



б)

Рис. 41.4

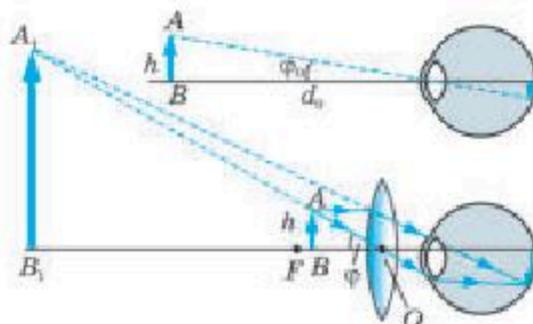


Рис. 41.5

Лупа. Для того чтобы различить мелкие детали рассматриваемого предмета, угол зрения должен быть большим. Увеличение угла зрения можно достигнуть приближением предмета к глазу, что обеспечивается с помощью оптических приборов. Большому углу зрения соответствует и большее изображение на сетчатке глаза. При малых же углах отношение размеров изображений приблизительно равно отношению углов зрения. *Отношение угла зрения при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения при наблюдении невооруженным глазом называется угловым увеличением прибора:* $\Gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0}$. Угол зрения, под которым предмет виден невооруженным глазом, равен $\varphi_0 = \frac{h}{d_0}$, где $d_0 = 25$ см — расстояние наилучшего видения; h — линейный размер предмета.

Простейший прибор, позволяющий рассматривать мелкие предметы, представляет собой собирающую короткофокусную линзу ($F \approx 10$ см). Эту линзу называют *лупой*. Лупу, как правило, помещают близко к глазу, а рассматриваемый предмет располагают в ее фокальной плоскости (рис. 41.5). При этом изображение на сетчатке получается без напряжения глаза. В лупу предмет виден под углом $\varphi = \frac{h}{F}$.

Найдем угловое увеличение лупы $\Gamma = \frac{h/F}{h/d_0} = \frac{d_0}{F}$. Увеличение, даваемое лупой, ограничено ее размерами. Нам известно, что линза с большой оптической силой — сильно выпуклая линза. Из-за этого размеры лупы приходится уменьшать, что ограничивает поле зрения и затрудняет пользование лупой. Именно поэтому лупы с увеличением более 40 не применяются.

Лупами пользуются часовые мастера, геологи, ботаники, криминалисты, филателисты.

Микроскоп. Для рассматривания совсем маленьких предметов используют *микроскоп* (рис. 41.6, а, б). Простейший микроскоп представляет собой комбинацию двух линз. Собирающая длиннофокусная линза, обращенная к предмету h , называется *объективом*. Она дает

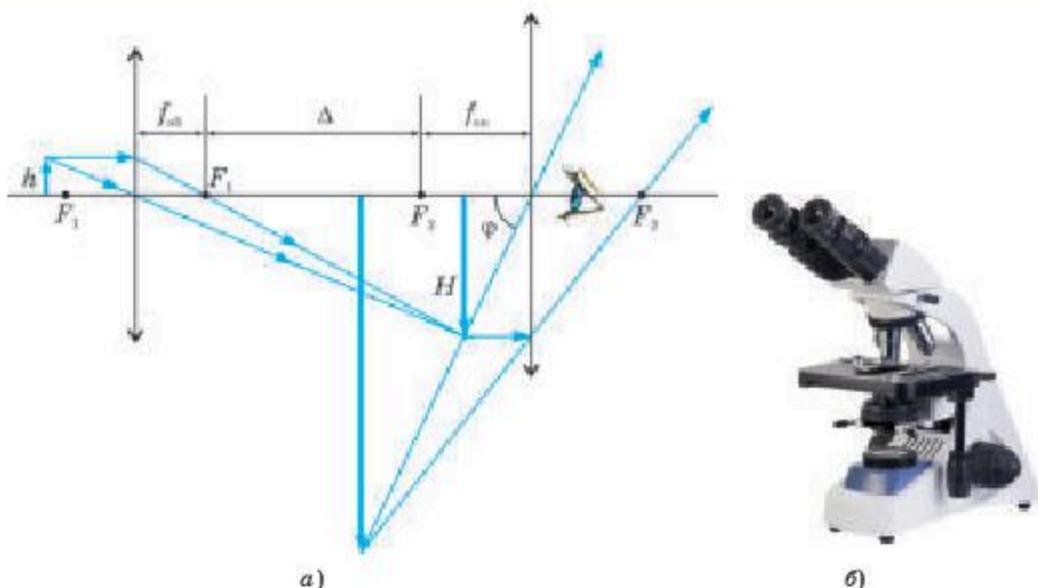


Рис. 41.6

действительное, увеличенное изображение предмета H . Это изображение рассматривается через другую собирающую короткофокусную линзу (лупу), которую называют *окуляр*. Рассматриваемый предмет располагается между фокусом объектива F_1 ближе к фокусу. Тогда объектив даст увеличенное, действительное изображение предмета, которое получается за объективом вблизи фокуса окуляра H .

Увеличением микроскопа (Γ) называется величина, определяемая отношением угла зрения φ , под которым виден предмет при наблюдении через микроскоп, к углу зрения φ_0 при наблюдении невооруженным глазом с расстояния наилучшего видения.

Так как $\varphi_0 = \frac{h}{d_0}$, а $\varphi = \frac{H}{F_2}$, то угловое увеличение микроскопа будет равно:

$$\Gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{\frac{H}{F_2}}{\frac{h}{d_0}} = \frac{Hd_0}{F_2h}, \quad (41.1)$$

где h — линейный размер предмета; H — линейный размер изображения, даваемого объективом; F_2 — фокусное расстояние окуляра; d_0 — расстояние наилучшего видения. Линейный размер первого изображения предмета найдем, исходя из того, что расстояние от первого изображения до фокуса объектива примерно совпадает с расстоянием между фокусами объектива и окуляра, т. е. $\Delta \approx \Delta + F_1$, так как $F_1 \ll \Delta$. Тогда $\frac{H}{h} \approx \frac{\Delta}{F_1}$, где F_1 — фокусное расстояние объектива. Расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра Δ на-

зывается *оптической длиной трубы* микроскопа. Подставим это в формулу (41.1) и получим:

$$\Gamma = \frac{d_0 \Delta}{F_1 \cdot F_2}. \quad (41.2)$$

Современные оптические микроскопы дают увеличение в 2—3 тысячи раз.

Кроме оптических приборов, позволяющих рассматривать мелкие предметы, существуют и другие оптические приборы, с помощью которых можно рассматривать предметы, расположенные на дальнем расстоянии. К ним относятся телескопы, зрительные трубы, бинокли и т. д. Первая в мире зрительная труба была изготовлена Г. Галилеем в 1609 г. С помощью объектива зрительной трубы получают изображение предмета вблизи глаза, которое затем рассматривается в окуляре, как в лупу.

Телескоп — это оптический прибор для наблюдения небесных тел (планет, звезд, комет и т. д.). Телескопы разделяются на линзовые (*рефракторные*, от лат. *refractus* — “преломлять”) и зеркальные (*рефлекторные*, от лат. *reflectere* — “отражать”). Первый зеркальный телескоп создал И.Ньютон в 1671—1672 гг. В телескопе-рефлекторе объективом служит параболическое зеркало большого диаметра. Так как зеркала лишены хроматической аберрации, то телескопы-рефлекторы имеют преимущество перед телескопами-рефракторами. Кроме того, изготовить зеркало большого диаметра гораздо проще, чем линзу. Поэтому современные большие телескопы являются рефлекторами.

Крупнейший в мире телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 6 м был изготовлен в СССР и установлен на Северном Кавказе, а крупнейший в мире телескоп-рефрактор с объективом диаметра 1,02 м изготовлен и установлен в США. Увеличение телескопов превышает 500 за счет большого фокусного расстояния объектива. С помощью телескопов можно различать предметы на Луне размером менее 1 м, а на Марсе — предметы размером около 100 м. Ход лучей в рефракторном телескопе изображен на рисунке 41.7, а, а его внешний вид — на рисунке 41.7, б.

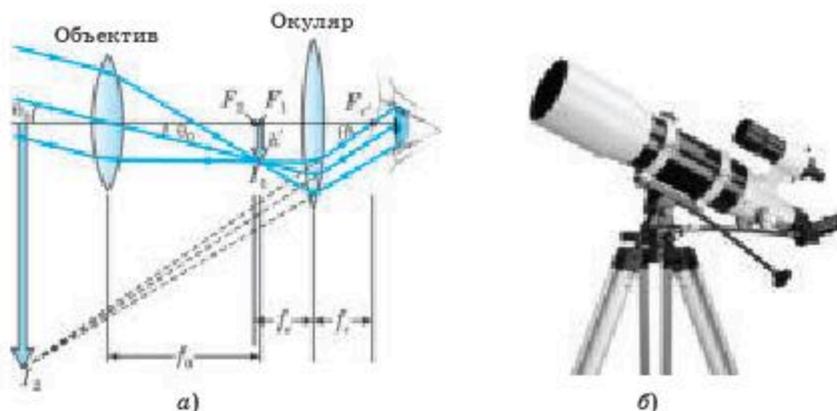


Рис. 41.7



1. С какой целью используют лупу?
2. Почему, изучая оптические приборы, мы рассматриваем строение глаза?
3. Почему при фотографировании сам предмет помещают за двойным фокусом?



Почему днем звезд не видно? Предложите свой способ увидеть звезду днем.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Близорукий глаз может различать более мелкие детали (например, читать более мелкий шрифт), чем нормальный глаз. Почему? Оказывается, это связано с тем, что близорукий глаз видит близкие предметы под большим углом зрения, чем нормальный глаз.

Интересно, а какая линза — рассеивающая или собирающая линза — увеличивает освещенность? Оказывается, что только в случае собирающей линзы можно увеличить освещенность. Именно поэтому в случае дальновзоркости очки увеличивают освещенность зрачка. Подумайте, почему у человека с дальновзоркостью при ношении очков освещенность зрачка выше, чем у человека с нормальным зрением?

Самое важное в главе 7

В *геометрической оптике*, которая изучает законы распространения света, есть четыре закона:

- **Закон прямолинейного распространения света:** луч света в однородной среде распространяется прямолинейно.

- **Закон независимого распространения света:** световые лучи, встречаясь, не оказывают влияния на дальнейшее распространение друг друга.

- **Закон отражения света:** 1) луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) угол падения α равен углу отражения γ .

- **Закон преломления света:** 1) луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и называется *относительным показателем преломления первой среды относительно второй*: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$.

- На явлении отражения и его законах работают многие оптические приборы, в том числе и плоские, и сферические зеркала.

- Во многих оптических приборах используется *линза* — прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. **Формула тонкой линзы** $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ позволяет найти положение изображения предмета, которое дает линза.

Лабораторная работа №1

Определение числа витков в обмотках трансформатора

Оборудование: трансформатор, источник регулируемого переменного напряжения, вольтметр переменного напряжения, длинный изолированный провод, соединительные провода.

Теория работы. На холостом ходу отношение напряжений на обмотках трансформатора равно отношению числа витков в них:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Напряжения можно измерить вольтметром. Чтобы определить число витков в обмотках, нужно использовать третью обмотку с известным числом витков в ней. Для этого наматывают на сердечник трансформатора третью обмотку с известным числом витков, для чего нужен длинный изолированный провод.

Тогда справедливы соотношения:

$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{n_1}{n_3}; \quad \frac{U_2}{U_3} = \frac{n_2}{n_3}.$$

Ход работы:

1. Намотайте на сердечник третью обмотку из длинного провода ($n_3 \approx 10 - 20$ витков) (рис. 1).
2. Подключите к первичной обмотке источник переменного напряжения.

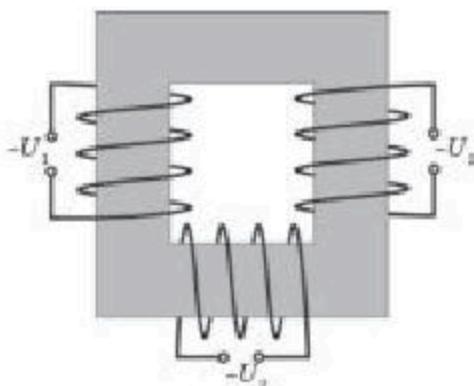


Рис. 1

3. Измерьте вольтметром напряжения на всех обмотках.
4. Определите число витков в обмотках трансформатора по формулам:

$$n_1 = \frac{U_1 \cdot n_3}{U_3}; \quad n_2 = \frac{U_2 \cdot n_3}{U_3}.$$

5. Заполните таблицу

Таблица 1

n_3	U_1	U_2	U_3	n_1	n_2

Лабораторная работа №2 Определение скорости звука в воздухе

Цель работы: с помощью метода, основанного на свойствах стоячей волны, определить скорость звука в воздухе.

Оборудование: стальной стержень на подставках или камертон, резиновый молоточек, набор труб, вставляющихся друг в друга.

Задание. Измерьте скорость распространения звука в воздухе и длину звуковой волны, используя явление интерференции звуковых волн.

Теория работы: при возбуждении механических колебаний в одном месте упругой непрерывной среды вследствие взаимодействия частиц среды возбуждаются колебания соседних частиц, за ними других, все более и более далеких. Расстояние, на которое распространяется колебательный процесс в среде за время, равное периоду T колебания частиц, называется *длиной волны* λ .

Для определения скорости v распространения волны нужно знать длину волны, а также период T или частоту ν колебаний:

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

или

$$v = \lambda \cdot \nu. \quad (1)$$

В данной работе источником звуковых волн служит камертон или стальной стержень на двух резиновых подставках. Если источник звука поднести к одному концу трубы, то звуковые колебания распространяются внутри ее. При достижении другого конца трубы звуковая волна частично отражается и распространяется в обратном направлении. Колебания падающей и отраженной звуковых волн складываются. Так как волны когерентные, то наблюдается их интерференция. Условием максимума амплитуды колебаний является равенство:

$$\Delta l = n\lambda, \quad (2)$$

где Δl — разность хода падающей и отраженной звуковых волн; $n = 1, 2, 3 \dots$ — целое число.

В случае, когда открыты оба конца трубы, разность хода Δl падающей и отраженной волн у одного конца трубы равна удвоенной длине трубы:

$$\Delta l = 2l. \quad (3)$$

Если в опыте определить минимальную длину l_{\min} трубы, при которой возникает интерференционный максимум звуковых волн, то из выражений (3) и (4) для $n = 1$ получим:

$$\lambda = \Delta l = 2l_{\min}. \quad (4)$$

Следовательно, скорость распространения звуковой волны равна:

$$v = 2l_{\min} \nu. \quad (5)$$

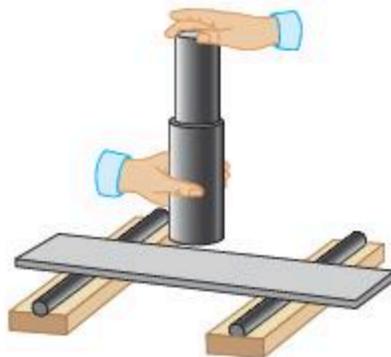


Рис. 2

Порядок выполнения работы:

1. Ударом резинового молоточка возбуждите колебания камертона или стального стержня, положенного на резиновые подставки.

2. Поднесите к источнику звука две вставленные одна в другую трубы (рис. 2). Изменяя общую длину перемещением одной трубы внутри другой, найдите такое их взаимное положение, при котором громкость звука максимальна.

3. Измерьте общую длину l трубы при выполнении условия максимума амплитуды колебаний звуковых волн.

4. Вычислите по формулам (4) и (5) длину звуковой волны и скорость ее распространения в воздухе.

Дополнительное задание.

Выполните опыт по измерению длины звуковой волны, используя трубу, закрытую с одного конца.

При отражении волны от закрытого конца трубы происходит так называемая потеря половины длины волны, и разность хода Δl в этом случае оказывается равной:

$$\Delta l = 2l + \frac{\lambda}{2},$$

Из условия максимума интерференционной картины для $n = 1$ получаем:

$$2l + \frac{\lambda}{2} = \lambda,$$

откуда

$$l = \frac{\lambda}{4}, \quad \lambda = 4l.$$

Так как $v = \lambda \nu$, то $v = 4l\nu$.

Лабораторная работа №3

Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Оборудование: 1) прибор для определения длины световой волны; 2) дифракционная решетка; 3) источник света.

Теория работы. Дифракция света наиболее отчетливо наблюдается при помощи дифракционной решетки. Согласно формуле дифракционной решетки $d \sin \varphi = k\lambda$, (1) максимумы для волн разной длины наблюдаются под разными углами. Так как угол φ мал (расстояние между решеткой и экраном a много больше, чем расстояние b от щели до места, где наблюдается максимум волны определенной длины), $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{L}$. Отсюда следует, что длина волны равна:

$$\lambda = \frac{dx}{kL}.$$

Ход работы:

1. Поместите дифракционную решетку в рамку прибора и укрепите ее на подставке подъемного столика.

2. Поместите ползунок (подвижный экран) на расстоянии 50 см от дифракционной решетки.

3. Наблюдая сквозь дифракционную решетку, направьте прибор так, чтобы последний был виден сквозь узкую прицельную щель щитка. При этом по обе стороны подвижного экрана на его черном фоне заметны дифракционные спектры нескольких порядков. В случае наклонного положения спектров поверните решетку на некоторый угол до устранения перекоса.

4. По шкале на экране определите красную и фиолетовую границы спектров первого порядка, а также отметьте положение зеленой линии спектра (рис. 3).

5. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

6. Установите ползунок с экраном на другом расстоянии от решетки и повторите измерения. Проведите это при трех разных положениях экрана.

7. Определите длину световой волны для красных, зеленых и фиолетовых лучей по расчетной формуле.



Рис. 3

Таблица 2

Порядок спектра, k	Период решетки, $d(\text{м})$	Расстояние L от решетки до экрана-шкалы, м	Расстояние от щели до линии спектра, $x(\text{м})$			Длина волны, м		
			красная	зеленая	фиолетовая	красная	зеленая	фиолетовая
1								
2								

8. Определите среднее значение длины волны для красных, зеленых и фиолетовых лучей.

9. Определите погрешность измерения.

Лабораторная работа №4

Наблюдение интерференции и дифракции света

Оборудование: 1) пластины стеклянные — 2 шт.; 2) лампы с прямой нитью накала (одна на весь класс); 3) засвеченная фотопленка; 4) лезвие.

Теория работы. Нам известно, что *интерференцией* называется явление наложения друг на друга двух или нескольких волн, при котором в пространстве образуется устойчивая, не изменяющаяся со временем картина распределения амплитуды результирующих колебаний (чередуются их минимумы и максимумы) в различных точках пространства.

Для того чтобы в пространстве возникла такая картина, необходимо, чтобы налагающиеся волны имели одинаковую частоту и неизменный сдвиг фаз колебаний в каждой точке пространства. Такие волны называются *когерентными*. Они создаются когерентными источниками волн, которые колеблются с одинаковой частотой и постоянным сдвигом фаз.

При сложении когерентных световых волн в одних точках пространства волны будут усиливать друг друга, а в других — ослаблять. При этом будут наблюдаться чередующиеся светлые и темные полосы. Это и есть *интерференция света*.

Мы часто наблюдаем разноцветные переливающиеся блики на каплях бензина, масла или нефти, растекшихся на поверхности воды, мыльных пузырях, крыльях стрекоз. Здесь мы имеем дело с интерференцией световых волн. Тонкая пленка бензина образует плоскопараллельную пластинку. Луч, идущий от источника света S , на пленке разбивается на несколько когерентных лучей, и мы можем наблюдать интерференцию света как в проходящем, так и в отраженном свете. Если воспользоваться двумя стеклянными пластинками, то с их помощью тоже можно пронаблюдать интерференцию света.

Дифракцией света называется отклонение света от прямолинейного распространения, или огибание светом препятствий.

Наблюдать дифракцию света от одной щели трудно, так как для этого размеры отверстия или препятствия должны быть соизмеримы с длиной световой волны, а на практике размеры препятствий всегда больше длины световой волны.

Если поместить перед источником света узкую щель, то на экране, расположенном в темном помещении, ожидается появление изображения щели. Оно и появлялось, но было окрашенным, и не всегда напротив щели было светлое пятно, иногда оно было темным. Или, если взять отверстие, в котором натянута тонкая проволока или человеческий волос, то на экране должна появиться тень от проволоки. На самом же деле на экране были видны несколько теней от проволоки.

Ход работы:

Наблюдение интерференции света:

1. Две стеклянные пластины тщательно протрите, сложите вместе и прижмите пальцами друг к другу.

2. Рассмотрите пластины в отраженном свете на темном фоне. При этом пластины надо располагать так, чтобы на них не образовывались яркие блики.

3. В местах, где пластины соприкасаются, наблюдайте яркие радужные замкнутые линии.

4. Заметьте изменение формы и расположения полученных интерференционных картин в зависимости от толщины воздушной прослойки между пластинами. Толщину прослойки изменяют путем более интенсивного сжатия пластин.

5. Попробуйте увидеть интерференционную картину в проходящем свете.

Наблюдение дифракции света:

1. Сделайте лезвием на фотоленке щель толщиной 0,5 мм.

2. Приставьте щель вплотную к глазу, расположив ее вертикально.

3. Посмотрите сквозь щель на вертикально расположенную светящуюся нить лампы, наблюдайте по обе стороны от нити радужные полосы (дифракционные спектры).

4. Изменяя ширину щели от 0,5 до 0,8 мм, заметьте, как при этом изменяются дифракционные спектры.

Лабораторная работа №5

Определение показателя преломления стекла с помощью плоскопараллельных пластин

Оборудование: 1) стеклянная плоскопараллельная пластинка; 2) английская булавка — 4 шт.; 3) линейка измерительная; 4) белая бумага; 5) лампочка на подставке; 6) батарея аккумуляторов; 7) ключ; 8) соединительные провода; 9) экран с щелью; 10) транспортир.

Теория работы. Явление преломления света наблюдается при переходе света из одной среды в другую. Происходит это потому, что в разных средах скорость света разная. Согласно закону преломления, имеем: $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, где n — относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Если первой средой является воздух, для которого абсолютный показатель преломления равен 1, то относительный показатель преломления второй среды будет равен абсолютному показателю.

Ход работы:

1. Соберите электрическую цепь, присоединив электрическую лампочку к батарее через ключ.

2. Установите перед лампочкой экран с щелью, а за ним положите лист белой бумаги.

3. Замкните цепь с помощью ключа и получите тонкую полоску света на бумаге.

4. Положите поперек полоски света стеклянную пластинку под произвольным углом.

5. Очертите контур пластинки и отметьте начало A и конец B падающего луча и точку F — точку выхода луча света из пластинки (рис. 4).

6. Разомкните цепь и снимите с листа бумаги стеклянную пластинку.

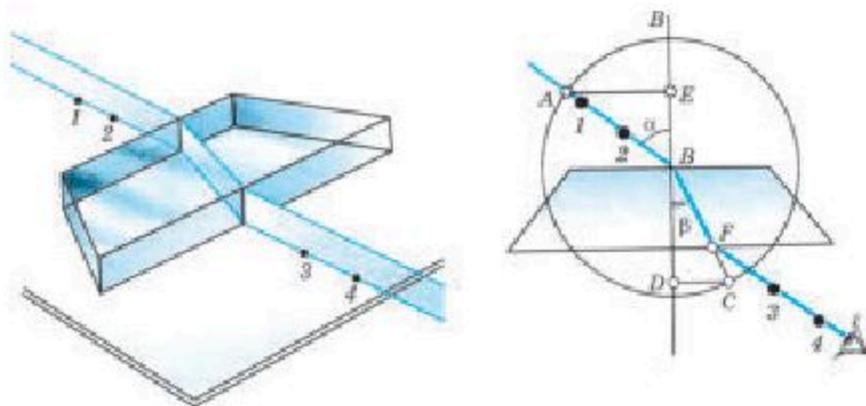


Рис. 4

7. Проведите окружность радиусом AB с центром в точке B . Проведите прямую через точку B и F (преломленный луч) и продлите ее до точки C , лежащей на радиусе AB . Восстановите перпендикуляр к пластинке в точке B .

8. Из точек A и C опустите перпендикуляры на перпендикуляр к пластинке. Измерьте длины перпендикуляров AE и DC . По формуле

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\overline{AE}}{\overline{DC}} = \frac{\overline{AE}}{\overline{AB}} \text{ рассчитайте показатель преломления стекла.}$$

9. Вычислите показатель преломления стекла по формуле.

10. Повторите опыт при других углах падения и сопоставьте результаты (три опыта).

11. Попробуйте провести опыты без источников света, используя английские булавки.

12. Попробуйте определить показатель преломления стекла, пользуясь не транспортиром, а измерительной линейкой.

Задания для проектной деятельности

Учебный проект — вид самостоятельной творческой деятельности, направленный на решение конкретной учебно-познавательной проблемы. Работу над ним можно условно разбить на следующие этапы.

Подготовительный этап

- Постановка учебно-познавательной проблемы.
- Определение темы проекта, ее обсуждение в классе.
- Формулировка цели и задач проекта.
- Определение типа проекта (индивидуальный, парный, групповой).
- Составление планов и графиков работы.
- Поиск и отбор информации.
- Систематизация и анализ собранного материала.

Основной этап

- Разработка проекта.
- Обсуждение полученных результатов.
- Оформление проекта.
- Подготовка его к презентации на различных школьных мероприятиях.

- Презентация проекта.

Заключительный этап

- Обсуждение и оценка выступлений.
- Подведение итогов.
- Составление отчетов о проделанной работе.
- Определение перспектив дальнейшего изучения темы.
- Проект может быть оформлен в виде доклада, реферата, компьютерной презентации. Примерный объем работы составляет 10—15 страниц (5—10 слайдов).

Учебные проекты по физике можно распределить по трем группам: “История развития физики”, “Эксперимент и моделирование — основные физические методы исследования природы”, “Практические приложения физических знаний”.

Ниже приведены примерные темы учебных проектов к курсу физики 11 класса.

История развития физики

- История открытия законов постоянного тока.
- История обнаружения электромагнитных волн.
- Из истории измерения скорости света.
- Из истории зарождения и развития радиосвязи.
- Фундаментальные опыты в волновой оптике.
- Из истории открытия и исследования внешнего фотоэффекта.

- Фундаментальные опыты Резерфорда по исследованию внутренней структуры атомов.
- История открытия теории относительности.
- Элементарные частицы.

Эксперимент и моделирование — основные физические методы исследования природы

- Конструирование и испытание электрических цепей постоянного тока с помощью компьютера.
- Исследование движения заряженной частицы в магнитном поле с помощью компьютера.
- Изучение опытов Фарадея по электромагнитной индукции с помощью компьютера.
- Наблюдение и исследование свойств электромагнитных свойств.
- Построение изображений в тонких линзах с помощью компьютера.
- Наблюдение и изучение интерференции световых волн, дифракции лазерного излучения на компакт-диске.
- Исследование закономерностей внешнего фотоэффекта с помощью компьютера.
- Исследование линейчатых спектров излучения с помощью компьютера.
- Исследование ядерных превращений с помощью компьютера.
- Наблюдение за фазами Луны.

Практические приложения физических знаний

- Виды самостоятельного разряда и их применение в технике.
- Различные виды электромагнитных излучений и их применение в науке и технике.
- Оптические явления в природе.
- Области применения лазерных технологий.
- Экологические проблемы работы атомных электростанций.
- Методы регистрации ионизирующих излучений.
- Семипалатинский полигон и движения Семей-Невада.
- Большой адронный коллайдер.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютный показатель преломления — физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в вакууме больше скорости распространения света в данной среде.

Амплитуда колебаний — максимальное значение отклонения от состояния равновесия, которое может принять колеблющаяся физическая величина.

Амплитудная модуляция — вид модуляции, при которой изменяемым параметром несущего сигнала является его амплитуда.

Аналоговый сигнал — сигнал данных, у которого каждый из представляемых параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений.

Байт — единица измерения информации, равная 8 битам.

Бегающая волна — волновое движение, при котором поверхность равных фаз перемещается с конечной скоростью.

Бит — единица измерения количества информации в двоичном коде, он равен информации об одном из двух равновероятных положений.

Гармонические колебания — периодические изменения физической величины во времени, происходящие по закону синуса или косинуса.

Генератор — устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

Геометрическая оптика — раздел оптики, изучающий распространение света, не рассматривая его волновую природу.

Действующее (эффективное) значение силы переменного тока — сила такого постоянного тока, который за одинаковое время выделяет в проводнике такое же количество теплоты, как и определяемый переменный ток.

Демодуляция — восстановление модулированных низкочастотных сигналов.

Дисперсия света — разложение белого цвета в спектр или зависимость показателя преломления вещества от длины волны падающего света.

Дифракция света — отклонение света от прямолинейного распространения или отгибание светом препятствий.

Дифракционная картина — ряд светлых полос, разделенных темными промежутками.

Дифракционная решетка — совокупность большого числа препятствий или отверстий на одинаковых расстояниях, на которых происходит дифракция света.

Интерференция — явление наложения друг на друга двух или нескольких когерентных волн (в том числе и световых), при котором в пространстве образуется устойчивая, не изменяющаяся со временем картина распределения амплитуды результирующих колебаний (чередуются их минимумы и максимумы) в различных точках пространства.

Колебания — движения или процессы, которые регулярно повторяются через более или менее равные промежутки времени.

Колебательный контур — цепь, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора.

Линзы — прозрачные тела, ограниченные одним или двумя сферическими поверхностями. Линзы делятся на собирающие и рассеивающие. Первые собирают проходящий сквозь них свет в одну точку, а вторые рассеивают его.

Луна — инструмент с короткофокусной линзой, предназначенный для рассматривания мелких предметов.

Математический маятник — это механическая колебательная система, состоящая из материальной точки, подвешенной на тонкой, невесомой и нерастяжимой нити или стержне в поле сил тяжести.

Механические колебания — периодические (или почти периодические) изменения физической величины, описывающей механическое движение (скорость, перемещение, кинетическая и потенциальная энергия и т. п.)

Модуляция — процесс медленного изменения одного из параметров высокочастотных электромагнитных колебаний — амплитуды, частоты или фазы в соответствующий параметр электромагнитных колебаний низкой (звуковой) частоты.

Оптикой называется раздел физики, изучающий закономерности распространения света, процессы взаимодействия света с веществом, природу света.

Относительный показатель преломления — физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в первой среде больше скорости распространения света во второй среде.

Отражение света — явление изменения направления распространения светового луча, наблюдаемое на границе двух сред. При этом луч света возвращается в исходную среду.

Переменный ток — электрический ток, который с течением времени периодически изменяется как по величине, так и по направлению.

Период колебаний — минимальный промежуток времени, в течение которого совершается одно полное колебание. Измеряется в секундах.

Плоское зеркало — гладкая отполированная поверхность, покрытая отражающим слоем, с радиусом кривизны, стремящимся к бесконечности.

Поляризация света — выделение из световых колебаний в естественном свете поляризованного в определенной плоскости составляющего света.

Поперечные волны — волны, в которых частицы среды совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Принцип Гюйгенса — каждая точка фронта волны в определенный момент времени может рассматриваться как источник новых (вторичных) волн.

Принцип Ферма — свет, идущий из одной точки пространства в другую, всегда распространяется по пути, для прохождения которого ему требуется экстремальное (как правило, минимальное) время.

Продольные волны — это волны, в которых частицы совершают колебания по направлению распространения волны.

Радиоактивный распад — спонтанное изменение состава (заряда Z , массового числа A) или внутреннего строения нестабильных атомных ядер путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов или ядерных фрагментов.

Радиолокация — обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн.

Радиотелеграфная связь — электрическая связь, при которой посредством радиоволн осуществляется передача дискретных (буквенных, цифровых или знаковых) сообщений.

Радиотелефонная связь — электрическая связь, при которой возможно с помощью электромагнитных волн разговаривать на дальних расстояниях.

Реактивное сопротивление — сопротивление прохождению электрического тока в цепи переменного тока, обусловленное наличием в ней индуктивности и (или) емкости.

Резонанс — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы и частоты собственных колебаний колебательной системы.

Световой луч — это линия, вдоль которой распространяется световая энергия, или линия, проведенная перпендикулярно волновому фронту и показывающая направление распространения волны.

Сигнал — физический процесс (волна), переносящий данную информацию.

Стоячие волны — волны, образующиеся в результате наложения двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами.

Телескоп — оптический прибор для наблюдения небесных тел.

Ток смещения — величина, пропорциональная скорости изменения индукции электрического поля.

Трансформатор — устройство для преобразования переменного тока и напряжения. Принцип действия основан на *законе электромагнитной индукции*.

Фотоаппарат — оптическое устройство с линзовой системой, с помощью которой получают изображение предмета на светочувствительной пленке или ПЗС матрице, сохраняющей изображение.

Цифровой сигнал — сигнал, который передается в виде последовательности дискретных (цифровых) значений.

Частота колебаний — число колебаний в одну секунду, величина, обратная периоду. Измеряется в герцах (Гц).

Шкала электромагнитных волн — электромагнитные волны разных диапазонов, от радиоволн до гамма-лучей.

Электромагнитные волны — электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве.

Электромагнитные колебания — периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, сопровождающиеся взаимными превращениями энергии электрического и магнитного полей.

Преломление света — явление изменения направления распространения световых лучей на границе двух сред, когда лучи проходят из одной среды в другую.

Термины, используемые в курсе Физика 11 класса

На русском языке	На казахском языке	На английском языке
Абсолютно черное тело	Абсолют қара дене	Black body
Абсолютный показатель преломления	Абсолютті сыну көрсеткіші	Absolute refractive index
Автоколебания	Автотербелістер	Self-oscillations
Амплитуда колебаний	Тербеліс амплитудасы	Amplitude of the oscillations
Амплитудная модуляция	Амплитудалық модуляция	Amplitude modulation
Аналоговый сигнал	Аналогтық сигнал	Analog signal
Байт	Байт	Byte
Бегущая волна	Қума толқын	Traveling wave
Бит	Бит	Bit
Бридеры	Бридер	Breeder reactor
Волновая поверхность	Толқындық бет	Wave surface
Волновой фронт	Толқындық шеп	Wave front
Волновое движение	Толқындық қозғалыс	Wave motion
Гармонические колебания	Гармоникалық тербелістер	Harmonic oscillations
Генератор	Генератор	Generator
Геометрическая оптика	Геометриялық оптика	Geometric optics
Демодуляция	Демодуляция	Demodulation
Дисперсия света	Жарық дисперсиясы	Light dispersion
Дифракцией света	Жарықтың дифракциясы	Diffraction of light
Дифракционная картина	Дифракциялық кескін	Diffraction pattern
Дифракционная решетка	Дифракциялық тор	Diffraction grating
Длина волны λ	Толқын ұзындығы λ	Wavelength
Закон Кирхгофа	Кирхгоф заңы	Kirchhoff's law
Изобары	Изобарлар	Isobar
Изотопы	Изотоптар	Isotopes
Интерференция	Интерференция	Interference
Когерентные источники волн	Когерентті толқын көздері	Coherent wave sources
Колебания	Тербелістер	Oscillation
Колебательный контур	Тербелмелі тізбек	Oscillating circuit
Линзы	Линзалар	Lenses
Лупа	Лупа	Magnifier
Математический маятник	Математикалық маятник	Mathematical pendulum
Механические колебания	Механикалық тербелістер	Mechanical oscillation
Модуляция	Модуляция	Modulation
Оптика	Оптика	Optics
Опыт Резерфорда	Резерфорд тәжірибесі	Rutherford's experiment

Относительный показатель преломления	Салыстырмалы сыну көрсеткіші	Relative refractive index
Отражение света	Жарық шағылуы	Light reflection
Переменный ток	Айнымалы ток	Alternating current
Период колебаний	Тербеліс периоды	Oscillation period
Плоское зеркало	Жазық айна	Flat mirror
Поляризация волн	Толқындардың поляризациясы	Wave polarization
Поляризация света	Жарықтың поляризациясы	Polarization of light
Поперечные волны	Көденең толқындар	Transverse waves
Правильное, или зеркальное, отражение	Дұрыс немесе айналы шағылу	Correct, or specular reflection
Радиолокация	Радар	Radar
Радиотелеграфная связь	Радиотелеграф байланысы	Radio telegraphy
Радиотелефонная связь	Радиотелефон байланысы	Radiotelephone communication
Рассеянное, или диффузное, отражение	Диффузиялық немесе шашыраңқы шағылу	Diffuse reflection
Реактивное сопротивление	Реактивті кедергі	Reactive resistance
Резонанс	Резонанс	Resonance
Рентгеновское излучение	Рентген сәулесі	Light ray
Сигнал	Сигнал	Signal
Стоячие волны	Тұрғын толқындар	Standing waves
Телескоп	Телескоп	Telescope
Трансформатор	Трансформатор	Transformer
Фазовая скорость	Фазалық жылдамдық	Phase velocity
Фотоаппарат	Фотоаппарат	Camera

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Касьянов В. А.* Физика: 11 класс. М.: Дрофа, 2018.
2. *Кокс Ф. Г., Парсондейдж М.* Энциклопедия окружающего мира. Атомы и молекулы. М.: Росмэн, 1997.
3. *Мухаметов М., Есжанов А.* и др. Физика: Учебник для 11 классов общеобразовательных школ. Алматы, 2008.
4. *Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б.* Физика: Учебник для 11 классов общеобразовательных учреждений. М.: Просвещение, 2002.
5. *Мякишев Г. Я., Синяков А. З.* Физика: Колебания и волны. Учебник для 11 классов для углубленного изучения физики. М.: Дрофа, 2001.
6. *Мякишев Г. Я., Синяков А. З.* Физика: Оптика и квантовая физика. Учебник для 11 классов для углубленного изучения физики. М.: Дрофа, 2002.
7. *Павленко Ю.Г.* Начало физики. Учебник. М.: Экзамен, 2005 г.
8. *Тарасов Л. В.* Физика в природе: Книга для учащихся. М.: Просвещение, 1988.
9. *Турчина Н.В.* Физика в задачах для поступающих в вузы. 2500 задач. М.: Оникс. Мир и образование, 2009 г.
10. Универсальный справочник школьника / Сост. Г. П. Шалаева. М.: Филологическое общество "Слово". Олма-Пресс образование, 2005.
11. Факты. Люди. Даты. События. Малый энциклопедический справочник. М.: Астрель, 2002.
12. Физика. Учебник для 11 классов с углубленным изучением физики. Профильный уровень. / Под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина. М.: Просвещение, 2007.
13. *Туякбаев С. Т., Насохова Ш. Б.,* и др. Физика: Учебник для 11 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. Алматы, 2015.
14. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики под редакцией Ю.И. Дика, О.Ф. Кабардина. М.: Просвещение, 2002 г.
15. *Шутов В.И., Сухов В.Г., Подлесный Д.В.* Эксперимент в физике. Физический практикум.
16. Энциклопедический словарь юного физика / Сост. В. А. Чуянов. М.: Педагогика, 1991.
17. Элементарный учебник физики. Том I, II, III. Под редакцией академика Г.С. Ландсберга. М.: АОЗТ "Шрайк", 1995 г.
18. <https://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics>

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Предисловие	4
Глава 1. Механические колебания	
§1. Уравнения и графики механических гармонических колебаний.....	5
§2. Математический и пружинный маятники.....	14
Глава 2. Электромагнитные колебания	
§3. Свободные электромагнитные колебания	21
§4. Вынужденные электромагнитные колебания. Автоколебания	30
§5. Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями	36
§6. Графические зависимости заряда и силы тока от времени в идеальном колебательном контуре	40
Глава 3. Переменный ток	
§7. Генератор переменного тока	46
§8. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток	53
§9. Активное и реактивное сопротивления в цепи переменного тока.....	58
§10. Закон Ома для последовательной электрической цепи переменного тока	65
§11. Мощность цепи переменного тока	70
§12. Резонанс напряжений в электрической цепи	75
§13. Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор	79
§14. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и в мире.....	89

Раздел II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Глава 4. Волновое движение	
§15. Упругие механические волны	95
§16. Распространение механических волн. Интерференция механических волн ...	101
§17. Стоячие волны	104
§18. Принцип Гюйгенса. Дифракция волн	108
Глава 5. Электромагнитные волны	
§19. Электромагнитные поле	115
§20. Электромагнитные волны	120
§21. Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца	123
§22. Энергия электромагнитных волн.....	127
§23. Свойства электромагнитных волн.....	133
§24. Принцип радиосвязи	137
§25. Модуляция и детектирование	141
§26. Распространение радиоволн. Радиолокация.....	144
§27. Цифровые технологии.....	149
§29. Оптико-волоконные коммуникационные сети.....	153
§29. Развитие средств связи в Казахстане	155
§30. Биологические действия высокочастотных электромагнитных волн и защита от них.....	158

Раздел III. ОПТИКА

Глава 6. Волновая оптика

§ 31. Электромагнитная природа света. Скорость света	161
§ 32. Интерференция света	163
§ 33. Дифракция света	172
§ 34. Дифракционные решетки	175
§ 35. Дисперсия света	180
§ 36. Поляризация света	183

Глава 7. Геометрическая оптика

§ 37. Геометрическая оптика. Прямолинейное распространение света. Тени, затмения. Экспериментальное определение скорости света	188
§ 38. Явление отражения света. Плоские и сферические зеркала	194
§ 39. Явление преломления света	204
§ 40. Линзы. Формула тонкой линзы	212
§ 41. Оптические приборы	221
<i>Лабораторная работа №1. Определение числа витков в обмотках трансформатора</i>	<i>229</i>
<i>Лабораторная работа №2. Определение скорости звука в воздухе</i>	<i>230</i>
<i>Лабораторная работа №3. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки</i>	<i>232</i>
<i>Лабораторная работа №4. Наблюдение интерференции и дифракции света</i>	<i>233</i>
<i>Лабораторная работа №5. Определение показателя преломления стекла с помощью плоскопараллельных пластин</i>	<i>235</i>
Задания для проектной деятельности	237
Глоссарий	239
Термины, используемые в курсе Физика 11 класса	242
Список литературы	244